

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**NÁVRH OPTICKÉHO VLÁKNOVÉHO SENZORU PRO  
DETEKCI VIBRACÍ**

DESIGN OF OPTICAL FIBER SENSOR FOR VIBRATION DETECTION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Adam Janoušek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Dejdar**

**BRNO 2020**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Adam Janoušek

**ID:** 186101

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh optického vláknového senzoru pro detekci vibrací

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor problematiky optických vláknových senzorů. Na základě teoretického rozboru bude vytvořen optický vláknový senzor snímající vibrace s vysokou vzorkovací frekvencí. Naměřená data budou zpracována v programovacím prostředí LabVIEW, kde bude možnost analýzy dat, včetně možnosti zobrazení parametrů události a místa výskytu. Celý senzorický systém by měl fungovat v reálném čase nebo s co nejmenším zpožděním. V rámci závěrečné práce bude také provedena optimalizace zapojení a realizace GUI v LabVIEW.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] UDD, Eric a William B SPILLMAN. Fiberopticsensors: an introduction forengineers and scientists. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-12684-4.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dejdar

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá detailním rozbořem problematiky optických vláknových senzorů. Konkrétně jsou zde rozebrány optické vlákna, různé druhy senzorů a realizace optického vláknového senzoru a senzorického systému, který byl optimalizován a zpracovává data v reálném čase. V diplomové práci je také popsáno programovací prostředí LabView a použité komponenty včetně celého senzorického systému.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Analog Discovery 2, Braggova mřížka, disperze, GUI, jednovidové vlákno, LabView, Mach-Zehnderův interferometr, optické vlákno, optický vláknový senzor, senzorický systém, útlum, vícevidové vlákno, vláknové mřížky

## ABSTRACT

The master theses deals with a detailed analysis of optical fiber sensors. Specifically, there are discussed optical fibers, various types of sensors and realization optical fiber sensor and sensor system that has been optimized and processed data in real time. In master theses also describes the LabView programming environment and uses components, including the entire sensor system of a sensors system that sends measured data.

## KEYWORDS

Analog Discovery 2, attenuation, dispersion, fiber Bragg grating, fiber grids, GUI, LabView, multimode fiber, Optical fiber, Optical fiber sensor, sensor system, singlemode fiber

JANOŠEK, Adam *Návrh optického vláknového senzoru pro detekci vibrací*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2020. 55 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Dejdar,



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh optického vláknového senzoru pro detekci vibrací“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu inženýru Petru Dejdarovi za konzultace a vedení při této práci. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni Janě Albrechtové za podporu a trpělivost při řešení a psaní této práce

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Úvod</b>   | <b>10</b> |
| <b>1 Optické vlákno</b>   | <b>11</b> |
| 1.1 Stavba optického vlákna . . . . .                             | 11        |
| 1.2 Princip šíření světla optickým vláknem . . . . .              | 11        |
| 1.3 Jednovidové vlákno . . . . .                                  | 13        |
| 1.4 Vícevidové vlákno . . . . .                                   | 13        |
| 1.4.1 Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu . . . . .  | 14        |
| 1.4.2 Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu . . . . . | 14        |
| <b>2 Vlastnosti optického vlákna</b>                              | <b>16</b> |
| 2.1 Numerická apertura . . . . .                                  | 16        |
| 2.2 Přenosová okna . . . . .                                      | 16        |
| 2.3 Disperze . . . . .  | 17        |
| 2.4 Ztráty v optických vláknech . . . . .                         | 19        |
| 2.4.1 Optický útlum . . . . .                                     | 20        |
| 2.5 Nelineární jevy při optickém přenosu . . . . .                | 21        |
| 2.5.1 Stimulovaný rozptyl . . . . .                               | 21        |
| 2.5.2 Mieův rozptyl . . . . .                                     | 21        |
| 2.5.3 Rayleighův rozptyl . . . . .                                | 22        |
| 2.5.4 Ramanův rozptyl . . . . .                                   | 22        |
| 2.5.5 Brillouinův rozptyl . . . . .                               | 23        |
| 2.5.6 Vlastní fázová modulace . . . . .                           | 23        |
| 2.5.7 Křížová fázová modulace . . . . .                           | 23        |
| <b>3 Optické vláknové senzory</b>                                 | <b>24</b> |
| 3.1 Amplitudové optické vláknové senzory . . . . .                | 25        |
| 3.1.1 Senzory se změnou útlumu . . . . .                          | 25        |
| 3.1.2 Senzory se změnou indexu lomu . . . . .                     | 26        |
| 3.1.3 Senzory s porušením okrajových podmínek . . . . .           | 26        |
| 3.1.4 Senzory s dynamickou vzájemnou vazbou . . . . .             | 27        |
| 3.1.5 Senzory s emisí záření . . . . .                            | 27        |
| 3.2 Fázové optické vláknové senzory . . . . .                     | 27        |
| 3.2.1 Machův-Zehnderův interferometr . . . . .                    | 28        |
| 3.2.2 Michelsonův interferometr . . . . .                         | 29        |
| 3.2.3 Sagnacův interferometr . . . . .                            | 30        |
| 3.3 Mřížkové optické vláknové senzory . . . . .                   | 30        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1    | Vláknové mřížky s dlouhou periodou . . . . .       | 31        |
| 3.3.2    | Nakloněné mřížky . . . . .                         | 31        |
| 3.3.3    | Braggovské mřížky . . . . .                        | 31        |
| 3.3.4    | Senzory s Braggovskou mřížkou (FBG) . . . . .      | 32        |
| 3.3.5    | Aplikace FBG . . . . .                             | 33        |
| <b>4</b> | <b>Analog Discovery 2</b>                          | <b>34</b> |
| 4.1      | BNC adaptér . . . . .                              | 34        |
| 4.2      | Program WaveForms . . . . .                        | 34        |
| <b>5</b> | <b>Vývojové prostředí LabView</b>                  | <b>35</b> |
| 5.1      | Front panel . . . . .                              | 36        |
| 5.2      | Block Diagram . . . . .                            | 36        |
| 5.3      | Ovladače Digilent Waveforms . . . . .              | 37        |
| 5.4      | Ovladače AD2 Toolkit . . . . .                     | 39        |
| <b>6</b> | <b>Realizace senzorického systému</b>              | <b>40</b> |
| 6.1      | Použitá zařízení a model pro demonstraci . . . . . | 40        |
| 6.1.1    | Laser LD100 Koheron . . . . .                      | 40        |
| 6.1.2    | Fotodektektor PD100 Koheron . . . . .              | 40        |
| 6.1.3    | Použitá optická vlákna . . . . .                   | 41        |
| 6.1.4    | Měnič THL 20-2422WI . . . . .                      | 41        |
| 6.1.5    | Vizualizace a funkce senzorového systému . . . . . | 42        |
| 6.2      | Realizace GUI . . . . .                            | 43        |
| 6.2.1    | Použití senzorického systému v praxi . . . . .     | 49        |
| 6.2.2    | Možnosti rozšíření senzorového systému . . . . .   | 49        |
|          | <b>Závěr</b>                                       | <b>50</b> |
|          | <b>Literatura</b>                                  | <b>51</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>            | <b>54</b> |
| <b>A</b> | <b>Přílohy</b>                                     | <b>55</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Základní zapojení optického spoje [1]. . . . .                          | 11 |
| 1.2  | Struktura optického vlákna [3]. . . . .                                 | 12 |
| 1.3  | Princip totálního odrazu. . . . .                                       | 12 |
| 1.4  | Jednovidové vlákno [3]. . . . .   | 13 |
| 1.5  | Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [3]. . . . .           | 14 |
| 1.6  | Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [3]. . . . .          | 15 |
| 2.1  | Závislost útlumu na vlnové délce s okny [1]. . . . .                    | 17 |
| 2.2  | Vliv disperze na přenášený optický signál. . . . .                      | 18 |
| 2.3  | Šíření světelného impulsu různými druhy vláken. . . . .                 | 19 |
| 2.4  | Závislost útlumu na vlnové délce [3]. . . . .                           | 20 |
| 2.5  | Rayleighův a Mieův rozptyl. . . . .                                     | 22 |
| 3.1  | Základní funkce optického vláknového senzoru. . . . .                   | 24 |
| 3.2  | Senzor s porušením okrajových podmínek za pomoci mikroohybů. . . . .    | 26 |
| 3.3  | Machův-Zehnderův interferometr. . . . .                                 | 28 |
| 3.4  | Michelsonův interferometr [18]. . . . .                                 | 29 |
| 3.5  | Sagnacův interferometr [17]. . . . .                                    | 30 |
| 3.6  | Braggovská vláknová mřížka. . . . .                                     | 32 |
| 3.7  | Znázornění Braggova zákona . . . . .                                    | 33 |
| 5.1  | LabView . . . . .   | 35 |
| 5.2  | Nabídka ve Block diagramu a Front panelu. . . . .                       | 36 |
| 5.3  | Ovladače Digilent Waveforms. . . . .                                    | 37 |
| 5.4  | Osciloskop MSO. . . . .   | 38 |
| 5.5  | Generátor funkcí FGEN. . . . .  | 38 |
| 5.6  | Přídavný zdroj Power Supply. . . . .                                    | 38 |
| 5.7  | Paleta Digital. . . . .   | 39 |
| 5.8  | AD2 Toolkit. . . . .  | 39 |
| 6.1  | Machův-Zehnderův interferometr implementovaný v modelu krajiny. . . . . | 41 |
| 6.2  | Model krajiny pro testování senzorického systému. . . . .               | 42 |
| 6.3  | Laser LD100. . . . .  | 43 |
| 6.4  | Fotodetektor PD100 a měnič THL 20-2422WI. . . . .                       | 43 |
| 6.5  | 3D model demonstračního senzorického systému. . . . .                   | 44 |
| 6.6  | Nabídka Options. . . . .  | 45 |
| 6.7  | Výstupní graf s nastavením. . . . .                                     | 45 |
| 6.8  | Klidový stav senzorického systému. . . . .                              | 46 |
| 6.9  | Indikátor aktivity v oblasti vlákna. . . . .                            | 47 |
| 6.10 | Indikace překročení nastavené úrovně. . . . .                           | 47 |
| 6.11 | Nabídka formátů pro uložení signálu. . . . .                            | 48 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 6.12 | Nastavení parametrů Audio ovladače. . . . .          | 48 |
| 6.13 | Doplněk pro načítání dostupné zvukové karty. . . . . | 49 |
| A.1  | Frontend senzorického systému. . . . .               | 55 |

# ÚVOD

Tato práce se zabývá v teoretické části detailním rozбором optických vláknových senzorů, optickým vláknům, jejich rozdělení, základním parametrům a principům přenosu optického signálu vláknem a v praktické části návrhem optického vláknového senzoru pro detekci vibrací, včetně použitých komponentů.

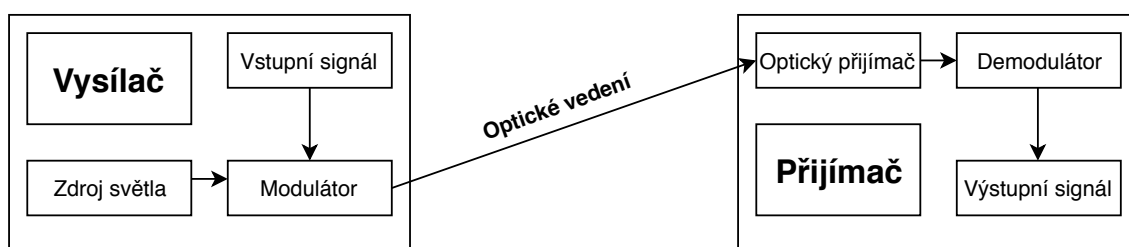
Cílem práce je rozebrat problematiku optických vláknových senzorů a vytvořit návrh optického vláknového senzoru snímající vibrace s vysokou vzorkovací frekvencí. Dalším cílem je optimalizace zapojení a realizace GUI v LabView.

V první kapitole byla rozebrána problematika optických vláken a jejich stavba a druhy vláken, optické vlákna jsou základním stavebním kamenem optických vláknových senzorů, proto zde byla popsána. Druhá kapitola se věnuje vlastnostem optického vlákna, kam patří hlavně útlum a disperze. Tyto vlastnosti závisí na mnoha faktorech od výroby, přes instalaci až do uložení kabelů. Další kapitola byla věnována samotným optickým vláknovým senzorům. Zde byly detailně popsány různé druhy senzorů, například amplitudové a fázové. Ze senzorů závislých na změně fáze byl pro tuto práci využit Machův-Zehnderův interferometr, na který působí měřená veličina a to vibrace. Pomocí tohoto interferometru je možné vibrace měřit. Čtvrtá kapitola je zaměřena na multifunkční zařízení Analog Discovery 2 a komponenty použité při realizaci praktické části této práce. Pátá kapitola se věnuje vývojovému prostředí LabView a detailnímu popisu ovladačů pro ovládání AD2 zařízení. V LabView probíhala realizace GUI. V závěrečné kapitole je popsána realizace celého senzorického systému a to včetně popisu použitých zařízení, ze kterého byl vytvořen a optimalizován interferometr a byla zde detailně popsáno GUI pro ovládání senzorického systému.

# 1 OPTICKÉ VLÁKNO

Optické vlákno je dielektrický vlnovod, nejčastěji vyrobený z různých materiálů na bázi skla ( $\text{SiO}_2$ ) nebo plastu, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny podél osy vlákna. Přenos informace optickým vláknem umožňuje optické záření. Oproti šíření signálu elektrickým signálem, u kterého jsou galvanické vazby elektricky nabitě elektrony, se šíří signál u optické vazby pomocí neutrálních fotonů, které na sebe vzájemně nepůsobí. Při přenosu nevznikají magnetická a elektrická pole, která bývají příčinou různých parazitních vazeb v elektrických obvodech. Optický spoj viz obr. 1.1 je proto tak odolný proti vnějším rušivým signálům a je obtížné ji odposlechnout. Stejně tak nedochází ke zpětnému ovlivňování z výstupu na vstup, spojení je dokonale jednosměrné.

Vlákna se skokovou změnou indexu lomu mohou být jednovidové nebo vícevidové. Liší se velikostí jádra. Vícevidová vlákna mají větší průměr jádra a mohou tak obsáhnout více paprsků, ale nevýhodou je menší vzdálenost pro komunikaci. Jednovidová mají z pravidla šířku jádra  $9\text{ }\mu\text{m}$  je to z důvodu, aby se tam vlezl právě jeden vid [1] [2].



Obr. 1.1: Základní zapojení optického spoje [1].

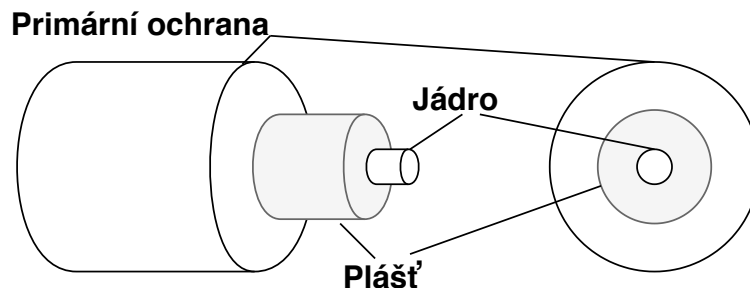
## 1.1 Stavba optického vlákna

Optické vlákno se skládá ze dvou materiálů, které se od sebe liší hodnotou indexu lomu. Obvykle se jedná o křemenné nebo plastové kruhové jádro s indexem lomu  $n_j$ , které je obklopeno válcovým pláštěm s indexem lomu  $n_p$ . Plášť slouží k ochraně a zpevnění jádra. Celé optické vlákno je obaleno primární ochranou, jak můžeme vidět na obr. 1.2 [3].

## 1.2 Princip šíření světla optickým vláknem

Úlohou optického vlákna je přivést od zdroje k detektoru světelný paprsek s co nejmenšími ztrátami. Světelný paprsek se při dopadu na rozhraní dvou optických





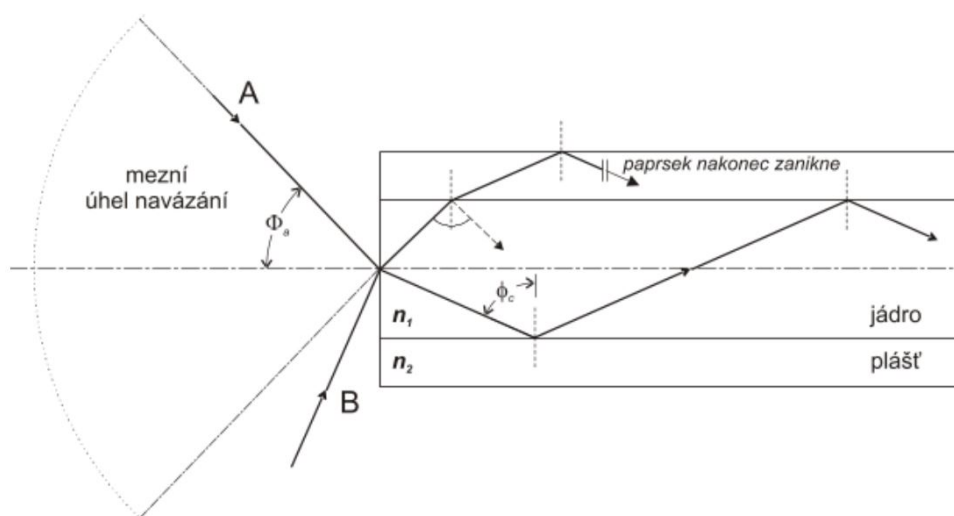
Obr. 1.2: Struktura optického vlákna [3].

prostředí částečně láme do druhého prostředí a částečně se odráží zpět. Aby mohlo být světlo vedeno optickým vláknem musí být do vlákna zavedeno z vnějšího prostředí, kterým je nejčastěji vzduch s indexem lomu  $n_v = 1$ . Šíří-li se paprsek opticky hustším prostředím pod různými úhly, v jednom okamžiku nastane situace, kdy úhel lomu je roven  $90^\circ$ . Takový úhel dopadu nazýváme úhlem mezním (kritickým). Překročí-li úhel dopadu tento mezní úhel, dojde k úplnému odrazu paprsku zpět do prostředí opticky hustšího. Podle Snellova zákona zde platí:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_j}{n_v} \rightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_j, \quad (1.1)$$

$n_j$ ,  $n_v$  značí indexy lomu prostředí jádra a vzduchu, dále  $\sin \theta_1$ ,  $\sin \theta_2$  jsou úhel dopadu a úhel odrazu, v tomto případě lomu, jak je vidět na obr. 1.3.

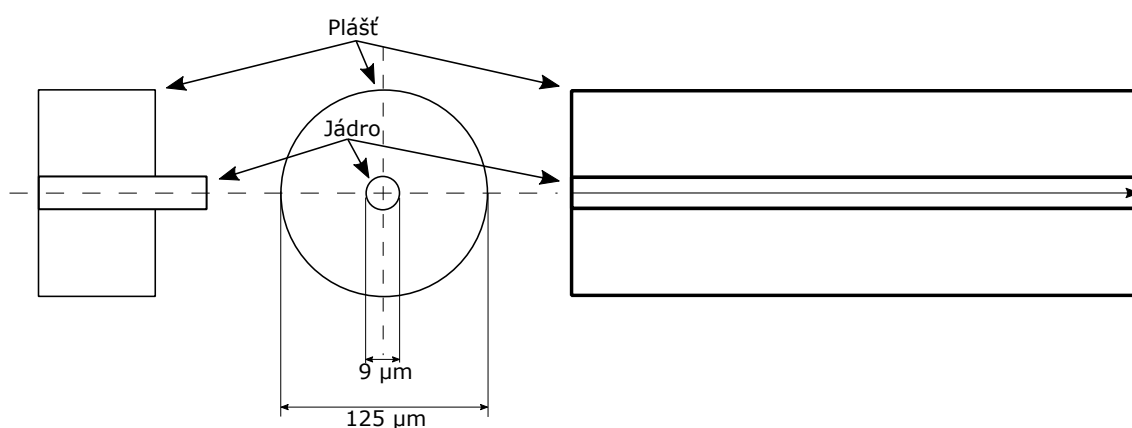
Jak už bylo řečeno, úkolem optického vlákna je přivést světlo ze zdroje k detektoru s co nejmenšími ztrátami, a toho lze dosáhnout s využitím podmínky totálního odrazu na rozhraní jádro – plášť [2] [4]:



Obr. 1.3: Princip totálního odrazu.

### 1.3 Jednovidové vlákno

Jednovidové optické vlákno (zkratka SM, anglicky single mode) je druh optického vlákna, který obsahuje pouze jeden světelný vid. Neuplatňuje se u nich vidová disperze, a proto je používán pro přenos dat na větší vzdálenosti (mezi městy, státy, kontinenty), díky nízké hodnotě útlumu. Na kratší vzdálenosti se používají vícevidová nebo gradientní optická vlákna. Tyto jednovidová vlákna mají malý průměr jádra (do  $10\text{ }\mu\text{m}$ ), a proto v jádru jednovidového vlákna není prostor pro existenci dalších vidů. Pro generování a detekci světla u jednovidových vláken je zapotřebí kvalitnějších a dražších zařízení. Jako generátory světla jsou zde používány nejvíce polovodičové lasery [1] [3].



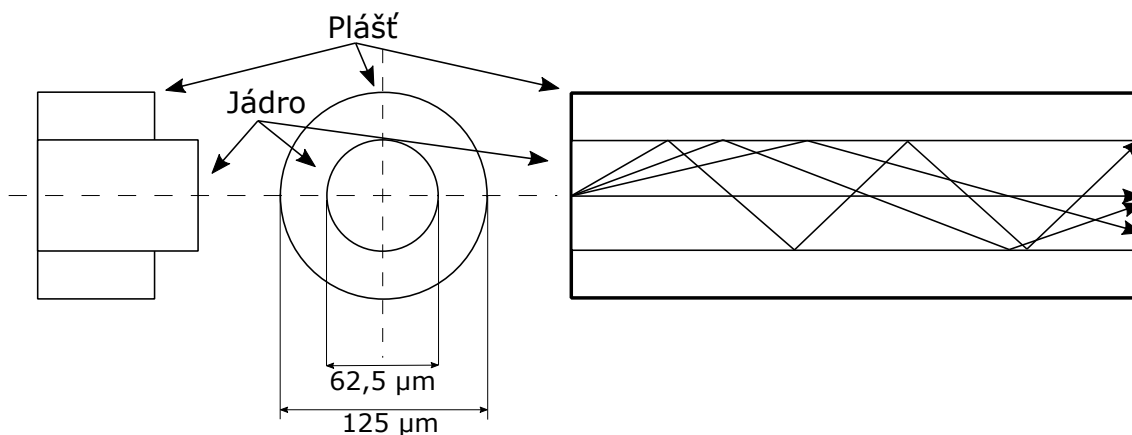
Obr. 1.4: Jednovidové vlákno [3].

### 1.4 Vícevidové vlákno

Vícevidové optické vlákno (zkratka MM, anglicky multimode) je druh optického vlákna, který obsahuje více světelných paprsků v jednom vlákně, proto jeho průměr jádra je podstatně větší ( $50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ ) než u jednovidových vláken. Počet vidů může být řádově v tisících při vlnové délce  $850\text{ nm}$ . Dochází zde k poměrně velké disperzi, protože každý vid vstupuje do vlákna pod jiným úhlem, a proto dráhy vidů jsou rozdílné. Světelné vidy jsou vygenerovány náraz světelným zdrojem a detektor je přijímá dohromady, nedokáže je přijímat samostatně. Tento typ vláken je nejčastěji používán pro komunikaci na krátké vzdálenosti do  $2\text{ km}$ , například uvnitř budovy nebo areálu [1] [3].

### 1.4.1 Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

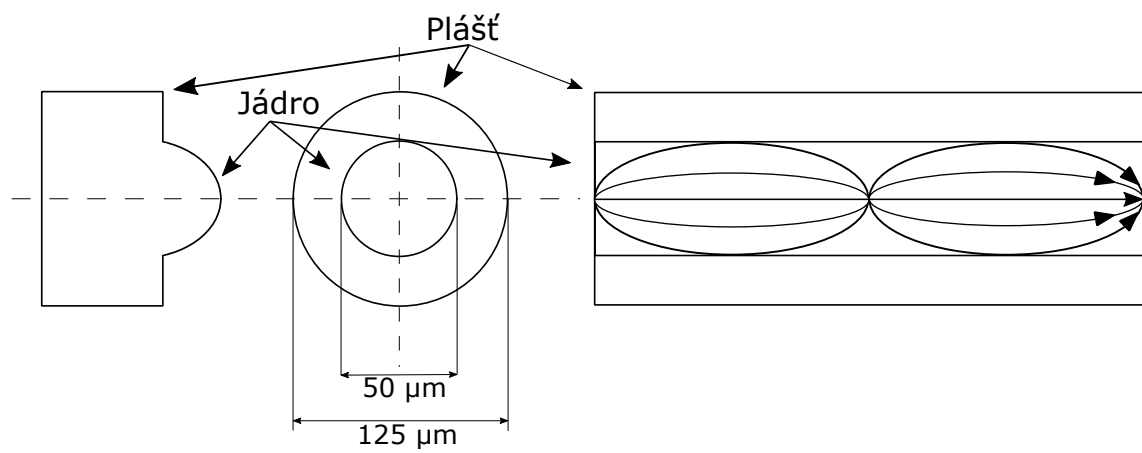
Vícevidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště se vyznačují jednoduchou výrobou a manipulací, v poměrně jednoduchém konstruování. Paprsky do vlákna vstupují pod mnoha úhly, šíří se totálním odrazem. Mají větší útlum, disperzi a malou přenosovou kapacitu [1] [3].



Obr. 1.5: Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu [3].

### 1.4.2 Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu

Vícevidová optická vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna, také nazývají jako gradientní vlákna, která se vyznačují menší disperzí, menším útlumem, částečně složitější výrobou a tím složitějším konstruováním a spojováním vláken. Mají však znatelně lepší parametry než vlákna vícevidová se skokovou změnou indexu lomu. Jádro optického vlákna má šířku  $50\text{ }\mu\text{m}$ , přičemž průměr pláště je  $125\text{ }\mu\text{m}$  [1]. Vlákno je tvořeno z tisíce tenkých vrstev, které se liší indexem lomu. Čím je paprsek dál od osy jádra, tím je index lomu menší, poté až paprsek přejde do kolmice, se nakonec vrátí k ose jádra [3].



Obr. 1.6: Vícevidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [3].

## 2 VLASTNOSTI OPTICKÉHO VLÁKNA

### 2.1 Numerická apertura

Jednou ze základních charakteristik optických vláken je numerická apertura(NA):

$$NA = \sqrt{(n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{obal}}^2)} = \sin \theta \quad (2.1)$$

Jedná se o maximální úhel, pod kterým může světelný paprsek vstupovat do optického vlákna tak, aby se jím mohl šířit. Numerická apertura je výsledkem sinu maximálního úhlu, což je úhel, pod kterým paprsek, který vstoupí do optického vlákna, se šíří od začátku až do konce. Pokud by paprsek dopadl pod větším úhlem na optické vlákno než je maximální úhel tak se optickým vláknem šířit nebude.

Je to charakteristika optického vlákna, která nám říká, jaký optický výkon lze navázat z okolního prostředí do optického vlákna. Pokud bude tato schopnost navázat optický signál větší, tak dokáže přenést více výkonu. To má však své meze, protože kromě indexu lomu jsou materiály optického jádra a obalu charakterizovány také roztažností a překročením určité meze tohoto kontrastu dojde k mechanickým poruchám (praskání, odloupávání apod.) [5] [6].

### 2.2 Přenosová okna

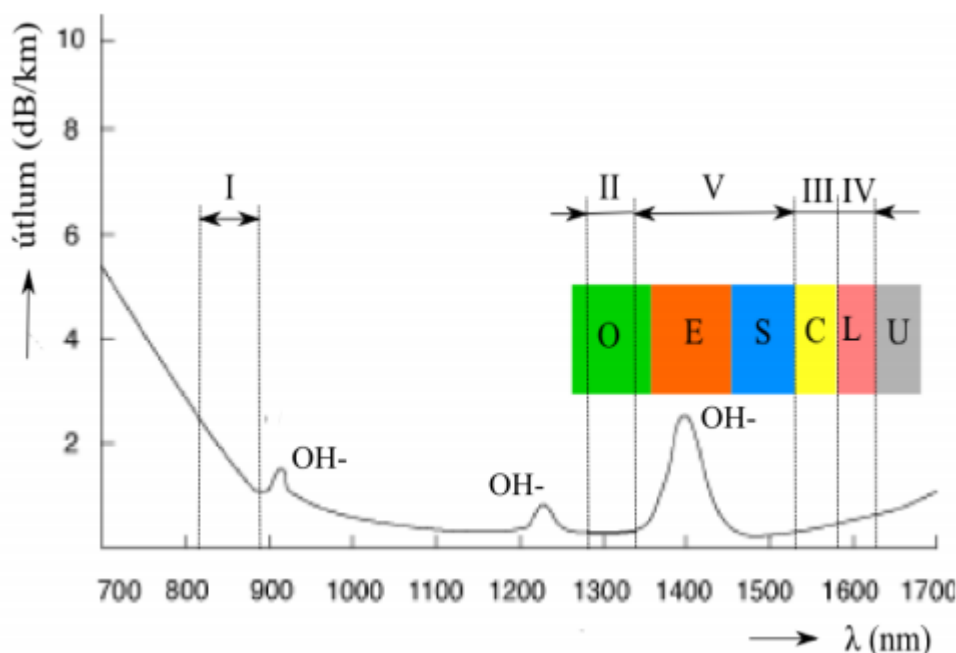
Útlumová charakteristika křemenných optických vláken vykazuje několik vrcholů a mezi nimi jsou úseky s nižším útlumem, kterým se říká okna viz obr. 2.1. V současné době jsou nejužívanějšími vlnovými délkami pro přenos po optickém vlákně 850 nm nejčastěji s použitím vícevidových vláken, 1310 nm pro přenos s využitím obou typů vláken, častěji se však jedná o přenos jednovidovými vlákny. Jednotlivá okna jsou definována takto [3]:

- I. Okno (840–940 nm) se používá k vícevidovému šíření. Útlumová charakteristika je zde velmi klesající a dosahované hodnoty měrného útlumu jsou nevhodné pro dálkové přenosy, protože jsou příliš vysoké.
- II. Okno (1280–1335 nm) je prvním plně využitelným pro jednovidový přenos. Je využíváno pro velké vzdálenosti (jednotky km). Hodnota měrného útlumu je zde těsně pod 0,35dB/km.
- III. Okno (1530–1565 nm) je oknem, kde se nachází minimum měrného útlumu a to v hodnotách 0,19-0,22dB/km. Využívá se pro dálkové přenosy.
- IV. Okno (1565–1625 nm) se oproti III. oknu liší minimálně. Spojením III. a IV. okna, za pomoci techniky WDM a optických zesilovačů, se téměř zdvojnásobí přenosová kapacita.

- V. Okno (1335–1530 nm) je nejmladším oknem, je dostupné teprve od 90. let, protože až v tu dobu byly zdokonaleny techniky výroby optického vlákna, eliminující příměsi OH tak, až se ztrácí lokální maximum útlumu na 1380 nm. Spojením II. až V. okna vznikne souvislý přenosový kanál o šířce pásma 50 THz.

V současnosti je přenos po optickém vlákne přesouván do II. až V. okna za použití jednovidových vláken. Podle ITU-T jsou definována tato okna (pro jednovidové vlákno) [3]:

- O (Original) 1260–1360 nm
- E (Extended) 1360–1460 nm
- S (Short) 1460–1530 nm
- C (Conventional) 1530–1565 nm
- L (Long) 1565–1625 nm
- U (Ultra-long) nad 1625 nm

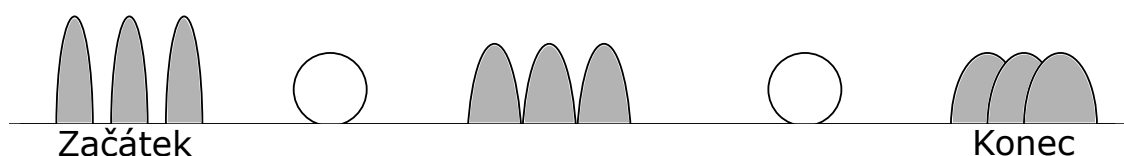


Obr. 2.1: Závislost útlumu na vlnové délce s okny [1].

## 2.3 Disperze

Disperze vln v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu, jak můžeme vidět na obr. 2.2. Definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na konci a na začátku vlákna. Zdroj záření vyšle světelný impuls, který je tvořen mnoha vidy, z nichž každý má různé spektrum (je tvořen složkami o různých vlnových délkách). Každý z těchto vidů vstupuje do vlákna pod jiným úhlem, vláknem

se tudíž šíří po různě dlouhých trasách a na konec vlákna nedorazí ve stejném časovém okamžiku, ale v určitém časovém intervalu. Detektor na konci vlákna nedokáže vyhodnotit jednotlivé vidy, které k němu dorazí, ale vyhodnocuje pouze světelný impulz jako celek. Světelný impulz nesoucí určitou informaci je zpožděn v čase, došlo ke změně jeho tvaru (zmenšuje se jeho amplituda a zvětšuje se jeho šířka), což má za následek zkreslení signálu, přičemž může dojít ke znehodnocení informace, kterou signál nese. V tomto případě, kdy jednotlivé vidy se šíří vláknem různou dobu, mluvíme o vidové disperzi. Vidová disperze převažuje u vícevidových vláken. Dále jsou vidy tvořeny spektrálními složkami (mají různou vlnovou délku), které se vláknem šíří různou rychlostí, v tomto případě se jedná o chromatickou disperzi [1] [3].



Obr. 2.2: Vliv disperze na přenášený optický signál.

### **Materiálová disperze**

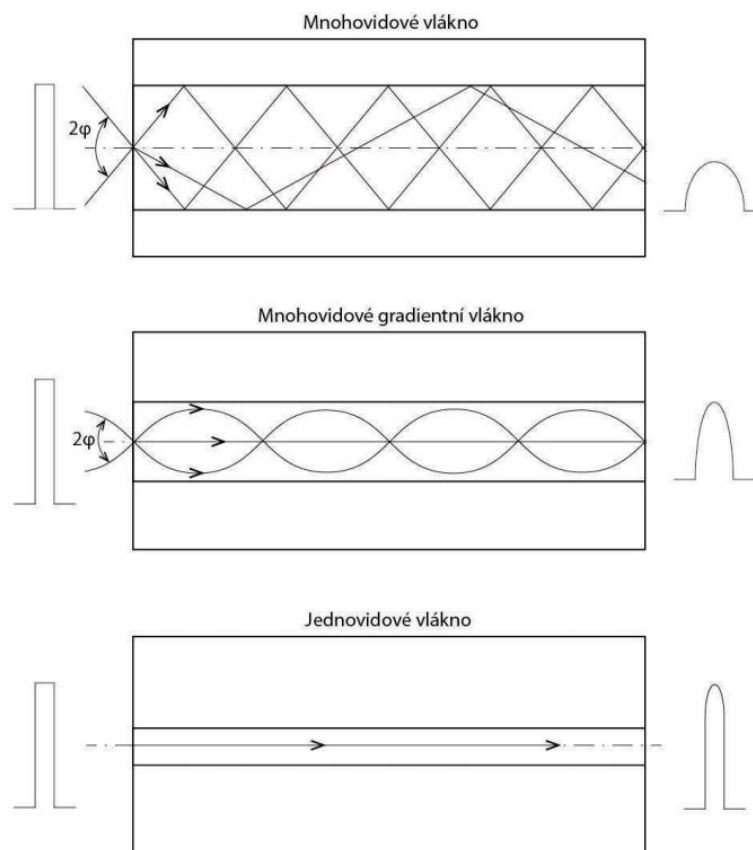
Materiálová disperze je způsobena rozdílnými rychlostmi šíření paprsků o různých vlnových délkách, což je způsobeno nelinearitou kmitočtového průběhu indexu lomu. Tím se každá vlnová délka materiálem šíří různě rychle, čímž se snižuje přenosová kapacita. Materiálová disperze ovlivňuje také dobu průchodu jednotlivých vidů, což má částečný vliv na disperzi vidovou. Nejmenších ztrát materiálovou disperzí je dosahováno pro křemenné sklo v oblasti  $1,27 \mu\text{m}$  [3].

### **Vlnová disperze**

Vlnová disperze je způsobena geometrickými vlastnostmi optického vlákna, přesněji poměrem poloměru jádra optického vlákna a vlnové délky signálu. To znamená, že se projevuje každá nepřesnost jádra vzniklá při samotné výrobě, a jádro tak není po celé své délce přesně kruhové [3].

### **Chromatická disperze**

Chromatická disperze je jev nejsilněji omezující přenosovou rychlost v optických jednovídrových vláknech. Vznikne spojením materiálové a vlnové disperze, z toho plyne,



Obr. 2.3: Šíření světelného impulsu různými druhy vláken.

že má na světelný impuls šířící se optickým vláknem stejné účinky jako materiálová a vlnová disperze [3].

### Vidová disperze

Vidová disperze je znázorněna na obr. 2.3. Je způsobená různou délkou trajektorie komponent, například různou délkou optické dráhy vidů záření, za předpokladu stejné rychlosti těchto vidů. Z uvedeného obrázku je zřejmé, že při zvětšujícím se odklonu paprsku od osy optického vlákna (vícevidové vlákno) dochází k prodloužení jeho trasy oproti paprsku šířícímu se podél osy optického vlákna (jednovidové vlákno). Vidová disperze se projevuje nejvíce u vícevidových vláken [3].

## 2.4 Ztráty v optických vláknech

Obecně se dají všechny ztráty v optických vláknech rozdělit [7]:

- Absorpční ztráty - tyto ztráty přeměňují světelnou energii na teplo.

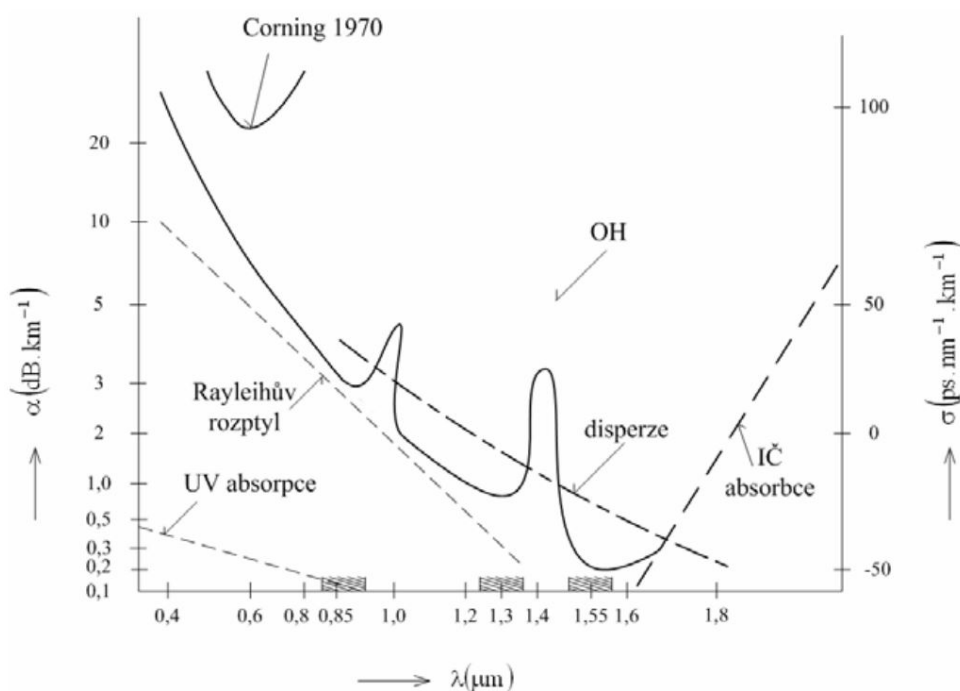


- Ohybové ztráty - při velkém ohybu vlákna se naruší podmínky pro totální odraz.
- Rozptylové ztráty - vznikají díky nečistotám a fluktuacím krystalické mřížky.
- Disperzní ztráty - jsou to jevy, které znehodnocují vlastnosti optických vláken. Známe vidovou, chromatickou (materiálová a vlnovodná) a polarizační disperzi. Každá má svoje specifikace, vliv na šíření světla a jinak se odstraňuje, či tlumí.

### 2.4.1 Optický útlum

Optický útlum je především způsobován absorpcí prostředí, v němž se energie šíří, vyzařováním do vlákna a rozptylem na nehomogenitách.

V optickém vláknu také klesá přenášený výkon se vzrůstající vzdáleností, podobně jako tomu je u běžných metalických vedení. U optického vlákna udáváme měrný útlum v jednotkách dB/km. Toto je vlastně měřítko udávající ztráty ve vedení světelného paprsku v optickém vlákne. Je to poměr vstupního výkonu  $P_1$  a výstupního výkonu  $P_2$  a tento poměr se vztahuje k vlnové délce. Útlum nám říká, jaký podíl navázaného světla na dané vlnové délce projde na druhý konec vlákna. Útlum je závislý na vlnové délce a je to proto, že absorpce i rozptyl, které jsou jeho příčinou, jsou spektrálně závislé [3].



Obr. 2.4: Závislost útlumu na vlnové délce [3].

Kromě rozptylu je optický útlum dále způsobován absorpcí.

Absorpce je jev, při kterém se energie světelné vlny šířící se vláknem mění v energii tepelnou. Důsledkem absorpce je snížení optického výkonu přenášeného vláknem. Ta vzniká v důsledku interakce záření s vlastním materiálem vlákna, případně s jeho nečistotami. Vlastní absorpce vlákna je způsobena interakcí fotonů světelných vln se základními stavebními atomy vlákna. V souvislosti s optickým útlumem křemenných optických vláken hovoříme obvykle o třech tzv. oknech propustnosti okolo 850, 1300 a 1550 nm, ve kterých jsou primárně provozovány optické komunikace. K nevlastní absorpci vlákna dochází při interakci procházejícího světla s nečistotami tj.s atomy příměsí přítomných v materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno [3] [6] [8].

## 2.5 Nelineární jevy při optickém přenosu

Vznik nelineárních jevů je podmíněn velkými hustotami světelného výkonu ve vlákně. Problém je v tom, že vlákna mají velmi malý průřez jádra a s příchodem systémů vlnového multiplexu se do delších tras začaly začleňovat optické zesilovače, které několika násobně zvyšují výkon ve vlákně. Pokud máme systém pracující s několika desítkami kanálů, tak výkon všech laserů se musí sečíst. Při návrhu tras s přenosovými rychlostmi 10 Gbit/s a víc na jeden kanál je nutno tuto problematiku řešit. Při výrobě vlákna dochází díky technologicky nedokonalým postupům k tvorbě mikronehomogenit uvnitř vlákna, které mění index lomu materiálu v daném místě. Dochází k takzvaným rozptylům [1].

### 2.5.1 Stimulovaný rozptyl

Je to fyzikální jev, při kterém dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy vlákna. Při rozptylu dochází i k mírnému posuvu vlnových délek směrem k vyšším hodnotám [1].

### 2.5.2 Mieův rozptyl

Mieův rozptyl se nazývá po objeviteli, německém fyzikovi, Gustavu Mieovi. Tento rozptyl vzniká na nehomogenitách, které jsou velikostně srovnatelné s vlnovou délkou rozptýleného světla a má velkou úhlovou závislost. V optických vláknech má Mieův rozptyl na svědomí mikroskopické bublinky, které jsou v optickém vlákně. Dále se na tomto rozptylu podílí nepravidelný průměr jádra, nečistoty uvnitř vlákna, napětí ve vlákně a další parametry, které mají za následek změnu vlnové délky světla. Mieův rozptyl způsobují hlavně nedokonalosti spojené s výrobním procesem [7].

Oproti Rayleighovu rozptylu je tento rozptyl obecnější a zahrnuje všechny vztahy vůči vlnové délce záření. Mieův rozptyl je složitější matematicky popsat

oproti Rayleighovu rozptylu. U optických vláken se tedy častěji používá Rayleighova rozptylu (pokud jsou splněny podmínky pro vznik), který je ovšem méně přesný než Mieův rozptyl.

Obrázek 2.5 znázorňuje rozdíl Rayleighova a Mieova rozptylu. Zde je vidět, že Rayleighův rozptyl se rozptyluje do zpětného i dopředného směru rovnoměrně, zatímco světlo rozptýlené Mieovým rozptylem se dále šíří pouze převážně směrem dopředným [9].



Obr. 2.5: Rayleighův a Mieův rozptyl.

### 2.5.3 Rayleighův rozptyl

Je dominující jev v optické komunikaci. Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky, když přes ně prochází optické záření a molekuly hmoty jádra optického vlákna. Vznikají lomy a odrazy částí paprsků, které se následkem toho tříští do všech směrů. Částečně se dá eliminovat posunem pracovní frekvence do infračervené oblasti. Rozptýlené optické záření, které změnilo směr šíření a je odkloněno, takže pronikne do pláště, se ztratí. Rayleighův rozptyl závisí na množství a velikostech oblastí s vyšší nebo nižší hustotou materiálu, které vznikají při výrobě.

Ztráty rozptylem jsou způsobeny tím, že molekuly v amorfním (amorfní látka nemá krystalickou mřížku s pravidelnými uspořádanými částicemi, jako jsou sklo, plyny a téměř všechny kapaliny) materiálu náhodně rozložené tvoří mikronehomogenity indexu lomu materiálu. Jsou-li tyto nehomogenity a drobné nečistoty rozměrově malé proti vlnové délce, pak rozptylové ztráty na nich vznikající se nazývají Rayleighovy [10].

### 2.5.4 Ramanův rozptyl

Podstatou Ramanova rozptylu je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s teplotně nabuzenými atomovými, nebo molekulovými vibracemi. V případě

sražení molekuly dané látky s fotonem vstupujícího záření, nastane rozptyl. Rozptýlené fotony mají jinou frekvenci, fázi i polarizaci. Pokud má rozptýlený foton nižší energii než původní, hovoříme o tzv. Stokesově fotonu. Pokud do prostředí posíláme fotony s vhodnou frekvencí, může dojít ke stimulovanému Ramanovu rozptylu, který je mnohem účinnější [1].

### 2.5.5 Brillouinův rozptyl

Je jevem v nelineárním optickém prostředí třetího řádu a souvisí s šířením akustické vlny v optickém vlákne. Je vyvolán podélnou akustickou vlnou o nadkritickém výkonu způsobí lokální změnu indexu lomu a v tomto místě dojde k oddělení fotonu od šířícího se signálu a tento foton se pak šíří v opačném směru proti této vlně. Foton má jinou frekvenci, než je frekvence šířící se vlny. Takto rozptýlená vlna je frekvenčně posunuta níže oproti postupné vlně.

Brillouinův rozptyl je zvláště významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit snížením koherentní délky signálu, neboli rozšířením spektra. Brillouinův rozptyl lze použít pro charakterizaci viskoelastických vlastností látek. Můžeme ho měřit pomocí Fabry-Perotova interferometru [11].

### 2.5.6 Vlastní fázová modulace

Vlastní fázová modulace je výsledkem působení optického impulsu na sebe. Růst a pokles výkonu na hranách optického impulsu vede na změny jeho fáze šíření a tím k jeho tvarovému zkreslení a rozšíření jeho spektra, které může v disperzním prostředí zpětně dále ovlivňovat jeho tvar. Při přílišném rozšíření impulsů pak dochází k jejich překrytí v mezisymbolové interferenci a následně k chybám přenosu [1].

### 2.5.7 Křížová fázová modulace

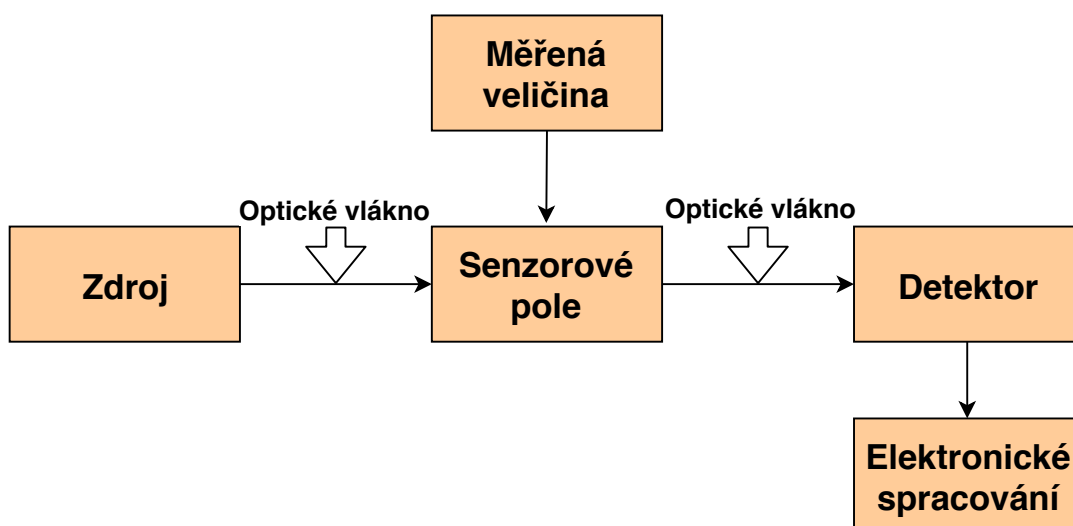
Principiálně podobným jevem jako vlastní fázová modulace, avšak za podmínek, kdy signál jedné vlnové délky fázově moduluje signál jiné vlnové délky. Proto k němu dochází jen u vícekanálových optických systémů [1].

### 3 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

Z roku 1972 pocházejí první zmínky o optických vláknových senzorech, které byly poprvé tohoto roku laboratorně odzkoušeny. Jednalo se o optické vláknové senzory akustických signálů ve vodě neboli hydrofony. K rozvoji optických vláknových senzorů přispěl také vznik optického vláknového gyroskopu. Výzkum optických vláknových senzorů byl především zaměřen na vojenskou oblast a později pronikal i do dalších oblastí průmyslu.

Díky celosvětovému intenzivnímu výzkumu dnes máme širokou nabídku snímacích senzorů a jejich součástí a i nadále optické vláknové senzory jsou neustále se rozvíjející zařízení, které je v současné době velmi využíváno v mnoha oblastech. Slouží k přenosu a zpracování signálů v systémech.

Senzory obecně vynikají svou odolností například vůči chemicky-agresivnímu prostředí vysokou citlivostí a svými rozměry. Avšak mají i své nevýhody, kterých se ne vždy podaří zbavit [12].



Obr. 3.1: Základní funkce optického vláknového senzoru.

Základní struktura optického senzoru viz obr. 3.1 se skládá ze zdroje (laser, LED dioda), optického vlákna, sensorového pole, ke kterému se přivádí měřená veličina, dále optického detektoru a z elektronických obvodů zpracování [1].

Optické vláknové senzory je možné rozdělit z hlediska prostorového uspořádání na:

- Bodové senzory
- Rozprostřené senzory (distribuované systémy)
- Polo-rozprostřené senzory (semi-distribuované)

Další rozdělení OVS je následovné:

- Amplitudové
- Fázové
- Mřížkové OVS

### 3.1 Amplitudové optické vláknové senzory

Tyto senzory jsou založeny na změně intenzity. Patří v současné době k nejrozšířenějším optickým vláknovým sensorům. Předností je poměrně jednoduchá konstrukce, používání vícevidových optických vláken a nízká cena. Tyto senzory používají koherentní i nekoherentní zdroje záření. Z hlediska konstrukce se zde dají využít tyto mechanismy – přenos, odraz, mikroohyby, absorpce, rozptyl, fluorescence, polarizace a optické mřížkování. U těchto sensorů dochází vlivem změny měřené veličiny k modulaci amplitudy optického signálu, který se šíří v optickém vlákně. K modulaci amplitudy optického signálu může dojít následujícím způsobem [13] [14]:

- Senzory, které pracují se změnou útlumu nebo optického prostředí mezi vstupním a výstupním OV.
- Senzory se změnou přechodu a odrazu optického signálu.
- Senzory s porušením okrajových podmínek šíření optického signálu.
- Senzory se změnou vzájemné vazby světlovodů.
- Senzory generací záření.

#### 3.1.1 Senzory se změnou útlumu

Senzory se změnou útlumu využívají dva přístupy a to přímo optické vlákno nebo vložené optické prostředí. Optické vlákno je využito jako citlivá část senzoru. Veličina, která je snímána mění útlum optického vlákna.

Nejrozšířenější senzory z této skupiny, jsou senzory měřící radioaktivní záření, při kterém dochází k poškození optického vlákna, čímž se u optického vlákna zvýší interakční délka mezi světlem a poškozeným jádrem vlákna a tím dochází k nárůstu útlumu optického vlákna. Při interakci radiačního záření s materiálem optického vlákna probíhá současně s procesem nárůstu útlumu i proces obnovení původní průhlednosti optického vlákna, který ovlivňuje zejména složení skla, teplota okolí a intenzita světla, které se šíří optickým vláknem. Dynamika obnovení původní průhlednosti (pokles přídatného útlumu) všeobecně nezávisí na vlnové délce a dávce záření, ale výrazně závisí na intenzitě světla, šířící se v optickém vlákně. Teplotní senzory tvoří významnou skupinu sensorů se změnou útlumu optického vlákna [13] [14].

### 3.1.2 Senzory se změnou indexu lomu

Senzory se změnou indexu lomu využívají vzájemné světelné vazby mezi dvěma konci optického vlákna. Při přerušení optického vlákna a změnách vazby dochází ke změně intenzity světelného signálu.

Tyto senzory využívají upevněného jednoho konce do pevné polohy, protějšší konec optického vlákna je volně uchycen přesně proti prvnímu vláknu. Měřená veličina působí na pohyblivý konec vlákna a ten se vychyluje, tak dochází ke změně intenzity procházejícího optického paprsku. Nevýhodou uvedených senzorů je výroba a nároky na přesnost mechanických prvků. Modulace světla se uskutečňuje vzájemným pohybem dvou absorpčních mřížek. Tento princip se využívá u optických vláknových mikrofónů [15].

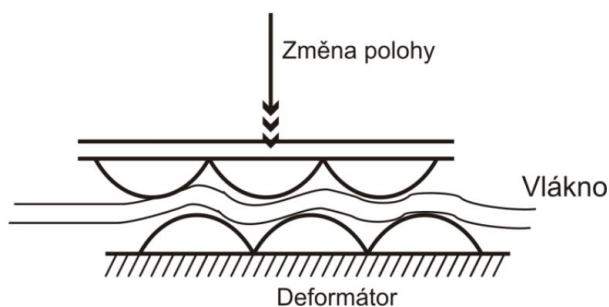
### 3.1.3 Senzory s porušením okrajových podmínek

Jedná se o senzory, které využívají porušení okrajových podmínek šíření paprsku v optickém vlákne vlivem snímané veličiny. Tento typ senzoru patří do řady intenzitních optovláknových senzorů.

Využívají především podmínky totálního odrazu světelného paprsku v optickém vláknu. Nejvíce těchto senzorů pracuje na principu mikroohybů. Kdy dochází k deformaci optického vlákna, jak můžeme vidět na obr. 3.2. Při ohybu optického vlákna pod kritický poloměr dojde k průniku světla do pláště optického vlákna a šíří se podél optického vlákna jako plášťové vlny [13].

Druhá skupina těchto senzorů využívá optická vlákna bez pláště, tudíž index lomu prostředí je neznámý, a proto se i amplituda přenášeného paprsku bude měnit v závislosti na prostředí kolem jádra.

Senzory s porušením okrajových podmínek vynikají svou kompatibilitostí a citlivostí. Jejich největší výhodou je jednoduchost konstrukce [15].



Obr. 3.2: Senzor s porušením okrajových podmínek za pomoci mikroohybů.

### 3.1.4 Senzory s dynamickou vzájemnou vazbou

Při porušení synchronizace vidů se uskutečňuje modulace světla těchto senzorech. Změnu modulace u porušení synchronizace vyvolají změny vlastností elektrooptického materiálu, ze kterého je vyrobeno optické vlákno. Modulace světla je možné upravit pomocí přenosu části energie do sousedního vlákna.

Na konstrukci tohoto senzoru se používají dvě optické vlákna, kde nastává optického tunelového jevu. Na úseku dlouhém několik centimetrů jsou k sobě přiložena dvě optické vlákna. Vazba mezi nimi, záleží na jejich vzájemné vzdálenosti (několik  $\mu\text{m}$ ). Měří se intenzita světla, které přešlo ze vstupního do výstupního optického vlákna. Senzor využívající optický tunelový jev lze konstruovat na základě jednovývodových i vícevývodových optických vláken.

Senzory s dynamickou vzájemnou vazbou se vyznačují vysokou citlivostí, avšak nároky na mechanickou přesnost technologie výroby jsou vysoké [15].

### 3.1.5 Senzory s emisí záření

Senzory s emisí záření využívají indukované záření v optickém materiálu působením optických, tepelných, radiačních a dalších vlivů. Senzory teploty s generací záření založeny na detekci teploty, vznikající ohřevem úseku optického vlákna, resp. ve vhodném materiálu umístěném na konci vlákna. Tento druh nepotřebuje ke své funkci zdroj světelného záření, protože teplotu určujeme nezávisle na místě ohřívání bodu. Zvýšením teploty rychle narůstá výkon [1] [13].

## 3.2 Fázové optické vláknové senzory

Optické interferometry neboli senzory závislé na změně fáze jsou používané tam, kde je vyžadována vysoká citlivost měření, mají vysokou pořizovací cenu, jsou konstrukčně a technologicky složité. Je to optická metoda, která sleduje rozdíly mezi dvěma optickými svazky, které prošly stejnou dráhou. Technika interferometrie je schopna měřit tři veličiny optického signálu podél jeho dráhy [13]:

- změnu vlnové délky
- změnu délky trasy
- změnu rychlosti šíření

Interference (neboli skládání vlnění) probíhá za těchto současně probíhajících podmínek – alespoň dvě a více vlnění, vlnění mají stejnou frekvenci, vlnění jsou koherentní a mezi interferujícími vlněními musí být fázový rozdíl. U těchto senzorů dochází vlivem snímané veličiny k modulaci fáze světelné vlny, která se šíří optickým vláknem.

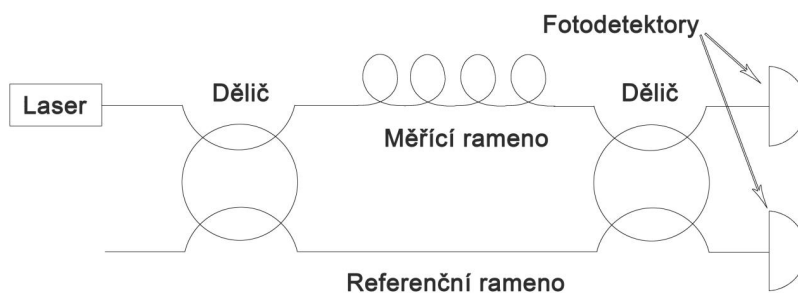


Interferometry lze rozdělit na tyto skupiny [13]:

- dvouramenný jednovidový interferometr (příkladem je Machův-Zehnderův nebo Michelsonův interferometr)
- jednovláknový interferometr s obousměrnou optickou vazbou (příkladem je Sagnacův interferometr)
- mezividový interferometr

### 3.2.1 Machův-Zehnderův interferometr

Machův-Zehnderův interferometr je používán v různých měřících aplikacích, kvůli jeho flexibilitě. Zdrojem optického záření je laser. První interferometry měly dvě nezávislé ramena, a to referenční a měřící rameno. Z principu funkce je nutné, aby referenční rameno bylo izolováno od okolních vlivů a aby nedocházelo k rušení. Vstupující světlo je rozdělené optickým děličem a zpět spojené druhým děličem. Modulování fáze signálu vzniká v sensorovém optickém vlákne díky působení snímané veličiny na délku, případně na průřez či index lomu jádra optického vlákna [16].



Obr. 3.3: Machův-Zehnderův interferometr.

První část světelného svazku projde skrz optický dělič a pokračuje systémem až k měřenému prvku. Tímto prvkem může být optické vlákno, u kterého se určuje rozdíl vzdáleností na obou ramenech interferometru, nebo válec s kapalinou nebo s plynem, kde se určuje index lomu látky ve válci. První světelný svazek tedy projde tímto měřeným prvkem a dorazí až ke druhému děliči, kde se spojí a pokračuje do fotodetektoru. Druhý světelný svazek v referenčním vlákne dorazí od prvního děliče až k druhému světelnému děliči bez změny [18].

Druhý světelný dělič oba světelné svazky opět spojí a jako jeden celek putují do fotodetektoru, ve kterém je zachycen interferenční obrazec, popřípadě je zde možné určit přímo fázový posun [18].

Interferometrické fázové senzory tvoří jednotnou konstrukční bázi na realizaci velmi citlivých senzorů různých fyzikálních veličin, jako jsou akustické signály, tlak,

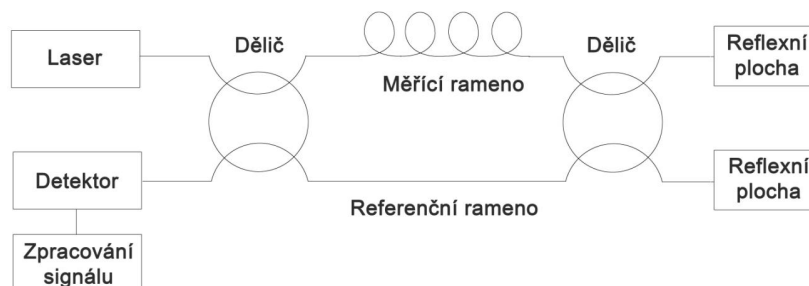
teplota, intenzita magnetického pole a elektrický proud. Velký vliv na vlastnosti těchto senzorů má pokrytí jak sensorového, tak i referenčního vlákna materiálem. Například pokud pokryjeme vlákno plastem, zvýšíme tím citlivost senzoru akustických signálů a tlaku o několik řádů. Pro snímání intenzity magnetického pole a elektrického proudu se sensorové vlákno vrstvou magnetostrikčního materiálu jako je například nikl, či kovové skla. Pokud vhodně zvolíme materiál a geometrii pokrytí optického vlákna, můžeme potlačit současné působení různých fyzikálních veličin [1].

Nevýhody dvouramenných jednovidových interferometrů jsou [1]:

- složitost optické konstrukce,
- jen pro jednovidová vlákna,
- složitost zpracování přijatého signálu,
- odstranění interference různých fyzikálních veličin (tlaku, teploty).

### 3.2.2 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr navrhl a sestavil v roce 1881 americký fyzik Albert Abraham Michelson. Postupem času docházelo k jeho mírným úpravám, kdy pomocí tohoto zařízení byla v roce 1887 dokázána existence světelného éteru [15] [16]. Schéma Michelsonova interferometru pro optické vláknové senzory je naznačeno na obrázku 3.4.



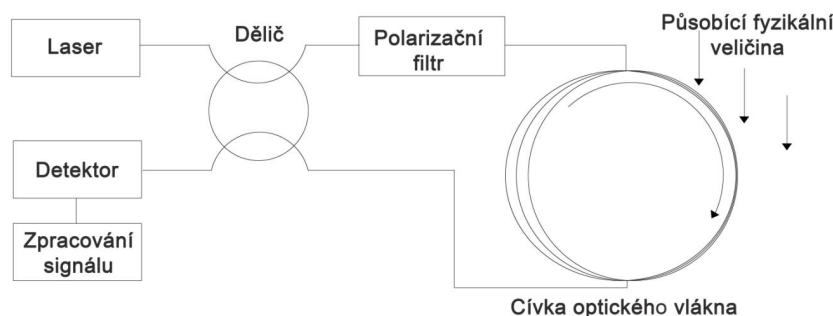
Obr. 3.4: Michelsonův interferometr [18].

Princip je velmi podobný Machův-Zehnderovu interferometru. Dochází k interferenci dvou paprsků, které prochází dvěma rameny interferometru, na konci každého ramene je světlo odražené zpět. Michelsonův interferometr obsahuje navíc reflexní plochy. Je taky možné využít mřížek s dlouhou periodou a provést konfiguraci pouze s jedním ramenem. Fyzikální veličiny způsobují změnu odrazových vlastností konce optického vlákna. Michelsonův vláknový interferometr není schopen měřit absolutní hodnoty jako teplotu nebo vzdálenost, ale je velmi přesný při měření malých změn těchto veličin. Lze s ním měřit rychlost pohybu externího zrcadla, malé posuny

a vzdálenosti s dělením amplitudy. U tohoto typu konstrukce lze užít vícevidového optického vlákna [15] [18].

### 3.2.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr vynalezl francouzský fyzik Georges Sagnac v roce 1913 a využívá Sagnacova jevu, k tomu dochází pokud se dvě vlny v rozdílných polarizačních stavech šíří proti sobě v optickém vlákně. Světelný paprsek jdoucí ze zdroje dopadne na polopropustné zrcadlo PZ. To jej rozdělí na dva svazky. V obou svazcích se elektromagnetická vlna šíří po uzavřené dráze, avšak jedna část ve směru hodinových ručiček a druhá v protisměru. Pokud mají dráhy stejnou velikost, tak spolu oba svazky interferují ve fázi. Pokud je však prostředím tvořícím dráhu interferometru otáčeno určitou rychlostí, je díky relativistickému skládání rychlostí různá rychlost šíření svazků ve směru a v protisměru otáčení. Výsledkem je detekovatelný fázový posuv  $\phi$  na výstupu z interferometru [15] [17] [18].



Obr. 3.5: Sagnacův interferometr [17].

Užitím Sagnacova interferometru je možné sestavit senzor úhlové rychlosti a polohy (optický vláknový gyroskop), kde se optická dráha realizuje pomocí optických vláken. Na rozdíl od mechanických gyroskopů, založených na setrvačných vlastnostech hmoty, jsou zde vyloučeny vlivy setrvačnosti, tření, vyšší odolnost ke změnám teploty, zrychlení, vibracím a jsou zde nižší energetické nároky na provoz, hmotnost i rozměry. Optický gyroskop má také nižší dobu uvedení do provozu a vyšší spolehlivost a životnost [15] [17].

## 3.3 Mřížkové optické vláknové senzory

Mřížkové optické vláknové senzory představují optické vlákno určité velikosti a daných parametrů, ve kterém je vytvořena UV zářením struktura optických mřížek.

Struktury s optickými mřížkami jsou využívány ve velké řadě aplikací s vysokým technickým i ekonomickým potenciálem. Mřížky v optických vláknech jsou pravděpodobně nejrozšířeněji používaná struktura uvnitř vláken pro telekomunikační i senzorové účely. V jádře optického vlákna se nachází tato struktura a jde o trvalou změnu indexu lomu. Ke změně indexu lomu dochází po určité periodě. Tyto periody se rozdělují na dva druhy:

- vláknové mřížky s dlouhou periodou, 100–500  $\mu\text{m}$ ,
- nakloněné mřížky,
- vláknové mřížky s periodou do 1  $\mu\text{m}$  a menší (Braggovské mřížky).

### 3.3.1 Vlákňové mřížky s dlouhou periodou

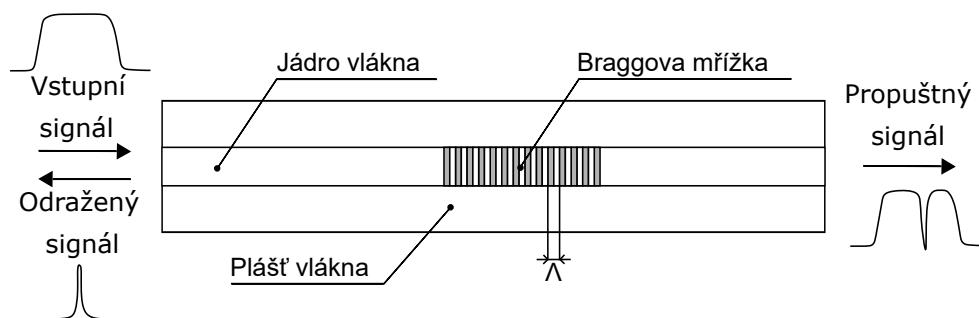
Vlákňové mřížky s dlouhou periodou jsou optické struktury tvořeny periodicky se opakující změnou indexu lomu v optickém vlákne. Perioda mřížky je mnohem větší než vlnová délka předcházejícího světla. Mřížky s dlouhou periodou slouží jako alternativní možnost pro filtrování vlnových délek ve velkém spektrálním rozsahu a jsou známe možností jednoduché výroby. Využívají rozdílnou rychlost šíření v jádře a plášti optického vlákna [18].

### 3.3.2 Nakloněné mřížky

Tato technologie spočívá, v tom že využijeme naklonění odrazových rovin mřížky ve vláknu o velmi malý úhel  $\alpha$  vzhledem k ose vlákna. Tímto nakloněním se energie odráží do jádrového vidu a část do plášťových vidů. Plášťový vid slouží pro odvedení energie záření směrem ke zdroji. Odražený signál neobsahuje plášťové vidy, jen lze vidět selektivní maximum hlavního odrazu. Plášťové vidy můžeme využít pro snímání fyzikálních veličin a najdeme je v oblasti pláště. Srovnáme-li běžné senzory se senzory s využitím nakloněných mřížek můžeme říci, že měření je znatelně dokonalejší [18].

### 3.3.3 Braggovské mřížky

V nejjednodušší formě se Braggovská mřížka skládá z periodické modulace indexu lomu v ose jádra jednovidového optického vlákna. Existuje několik typů výroby Braggovských mřížek, pro které je společný prvek UV laser, jehož koherentní záření zapíše požadovanou strukturu mřížky do jádra vlákna. Obecně platí pro zajištění interakce světelné vlny s jakoukoliv difrakční mřížkou, že mřížka musí obsahovat více než tisíc period změn indexu lomu a současně musí být dosaženo velkého rozdílu mezi minimem a maximem indexu lomu ve struktuře [19] [20].



Obr. 3.6: Braggovská vláknová mřížka.

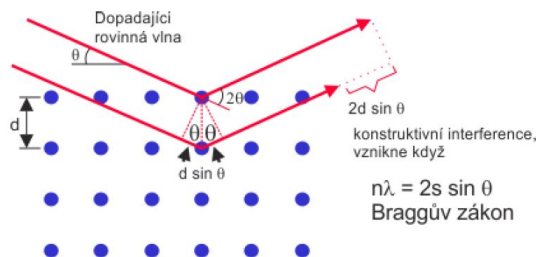
### Výroba Braggovské mřížky

Většina mřížek je vyrobena mechanickým nebo chemickým stažením krycí vrstvy. Vlákná, která jsou svlékána mechanickým způsobem, projevují následně velmi malou pevnost, z tohoto důvodu se upřednostňuje chemické svlékání obvykle pomocí horké kyseliny sírové. V současné době se však preferuje přímé vytvoření Braggovské mřížky již v průběhu výroby vlákna tavením nebo rytím skrze speciální krycí obal. Vláknem je totiž vystaveno minimálním mechanickým vlivům a jeho pevnost je ovlivněna minimálně nebo vůbec. Jeden z velmi šetrných postupů pro zachování pevnosti je tzv. Studené psaní „Cold-writing“. Pro tento proces není potřeba obnažené optické vlákno pro účel zapsání FBG. To umožňuje vláknu ponechat si pevnost psaním nedotčeného vlákna a významně tím snižuje možnost poškození vlivem lomu. Braggovská mřížka se vyrábí použitím germanium-křemičitého optického vlákna. Optické vlákno je fotosenzitivní, index lomu je závislý na velikosti a času vystavení UV zářením [19] [21].

### 3.3.4 Senzory s Braggovskou mřížkou (FBG)

Braggovské mřížky jsou citlivé jak na deformaci, mechanické napětí a teplotu. To znamená, že FBG mohou být použity jako snímací prvky optovláknových senzorů. Deformace ovlivňuje odezvu FBG přímo a to prostřednictvím expanze nebo komprese velikosti mřížky, což vede ke změně indexu lomu, avšak v sensorice se využívá účinku mechanické deformace. Pro měření délkových změn Braggovskými mřížkami se může spektrum měřit v propustném nebo reflexním směru [21].

Princip činnosti FBG se řídí Braggovým zákonem viz obr. 3.7, který zaručuje, že energie navázaná do oblasti jádra se díky podélnému mřížkování při odrazu na rozhraních vrací zpět do jádra. Jejich nejčastější využití v sensorové technice tedy spočívá v transportu UV záření či slabého rentgenového záření, neboť ostatní přenosová média jsou pro tato záření příliš ztrátová. Konkrétně pro tento účel se využívají vlákna se vzduchovým jádrem [19].



Obr. 3.7: Znázornění Braggova zákona

### 3.3.5 Aplikace FBG

FBG lze rozdělit tyto senzory na dvě skupiny:

- monitorující činnost
- sledovací aplikace

Senzory monitorující činnost obvykle vyžadují střední stupeň citlivosti vůči měřené veličině, kdežto senzory pro sledování vyžadují citlivost velmi vysokou. Senzory pro monitorování činnosti se obvykle používají pro monitorování napětí ve velkých strukturách (např. most, trup lodi, atd.), monitorování a sledování kritických parametrů v kritických místech daného systému (teplota, tlak, zrychlení), monitorování vibrací pro určení místa poruch.

Senzory sledovacích aplikací jsou naopak používány pro měření velmi slabých signálů a vyžadují tak velmi vysoké rozlišení. Dobrým příkladem vysoce výkonného sledovacího senzoru může být vláknově optický hydrofon, používaný pro podvodní pozorování. Tento senzor kvůli vysokým požadavkům na rozlišení bylo dříve velmi obtížné sestavit pomocí Braggovských mřížek a výhradně se využívalo vláknových interferometrických senzorů. To změnil až příchod vláknových laserových senzorů s Braggovskou mřížkou, které umožnily vznik nových sledovacích senzorů [18].

Tab. 3.1: Aplikace různých typů mřížkových senzorů

| Typ mřížkování                         | Popis  |
|--|--|
| Mřížky s krátkou periodou              | Senzory tlakové<br>Senzory zrychlení<br>Senzory mechanického zatížení<br>Senzory detekce plynů |
| Laserové senzory s Braggovskou mřížkou | Hydrofony<br>Akustické senzory   |
| Mřížky s dlouhou periodou              | Senzory ohybové<br>Senzory chemické  |

## 4 ANALOG DISCOVERY 2

Analog Discovery 2 (AD2) je multifunkční USB zařízení sdružující dvoukanálový osciloskop, funkční generátor analogových průběhů, 16-ti kanálový logický analyzátor, pattern generátor včetně programovatelného zdroje napájení. Toto zařízení je napájené přes USB a umožňuje vytvářet a testovat analogové a digitální obvody v jakémkoliv prostředí. Jednoduché sondy připojují analogové a digitální vstupy a výstupy do obvodu. Analog Discovery BNC Adapter a BNC sondy mohou připojovat a používat vstupy a výstupy. Volný software WaveForms řídí systém Analog Discovery 2 a může být konfigurován tak, aby fungoval jako několik tradičních nástrojů. Analogové a digitální vstupy a výstupy mohou být připojeny k okruhu pomocí jednoduchých drátových sond. Alternativně mohou být pro připojení a použití vstupů a výstupů použity sondy BNC Analog Discovery Adapter a BNC [22] [24].

### 4.1 BNC adaptér

BNC adaptér je určen pro Analog Discovery 2 a umožňuje testování standardních vodičů a sond zakončených BNC konektorem. Poskytuje zakončení pro oba osciloskopové kanály zařízení AD2. Každý kanál osciloskopu lze nastavit jako AC nebo DC pomocí jumperů, které jsou umístěné za konektorem BNC. Kanály mohou mít vybráno buď 50 ohmové zakončení nebo 0 ohmové zakončení. To umožňuje uživateli porovnat výstupní impedanci AD2 buď se standardním 50 ohmovým testovacím kabelem, nebo přímo s elektrodou [23].

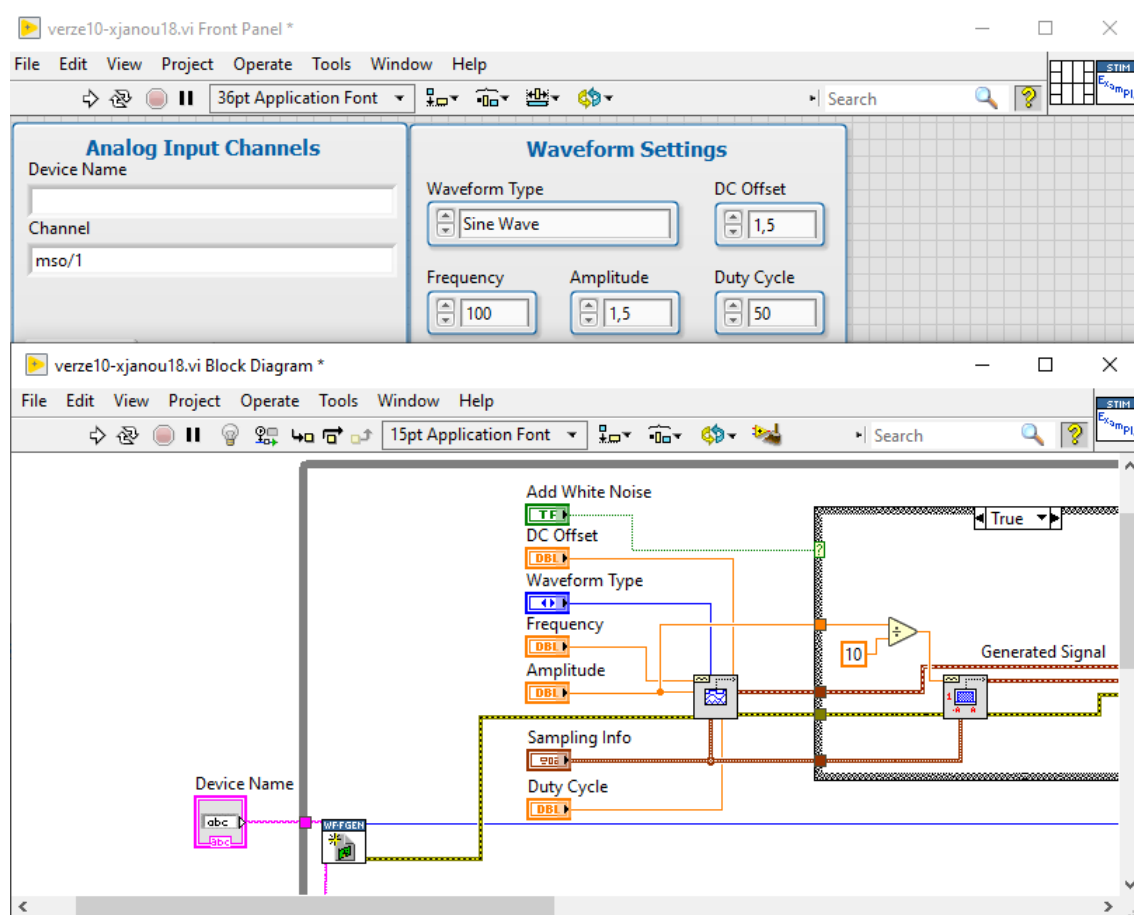
### 4.2 Program WaveForms

WaveForms je uživatelské rozhraní pro Analog Discovery 2. Je to vlastní sada nástrojů, která umožňuje uživatelům přístup k plné funkčnosti systému Analog Discovery 2. Kompatibilní s MacOS, Windows a Linux, poskytuje uživatelům přenosný osciloskop, generátor tvarů vln, napájecí zdroje, datalogger, logický analyzátor, generátor vzorů, statické I/O, síťový analyzátor, analyzátor spektra a editor skriptů. Je to stejné softwarové rozhraní, které se používá s deskami Digital Discovery a Electronics Explorer [25].

Program WaveForms byl využit pro vyzkoušení zařízení Analog Discovery 2 a zároveň proběhlo seznámení s funkcemi, které zařízení Analog Discovery 2 společně s programem WaveForms dokáže.

## 5 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ LABVIEW

Pro realizaci praktické části této práce bylo využito grafické vývojové prostředí LabView od společnosti National Instruments obr. 5.1.



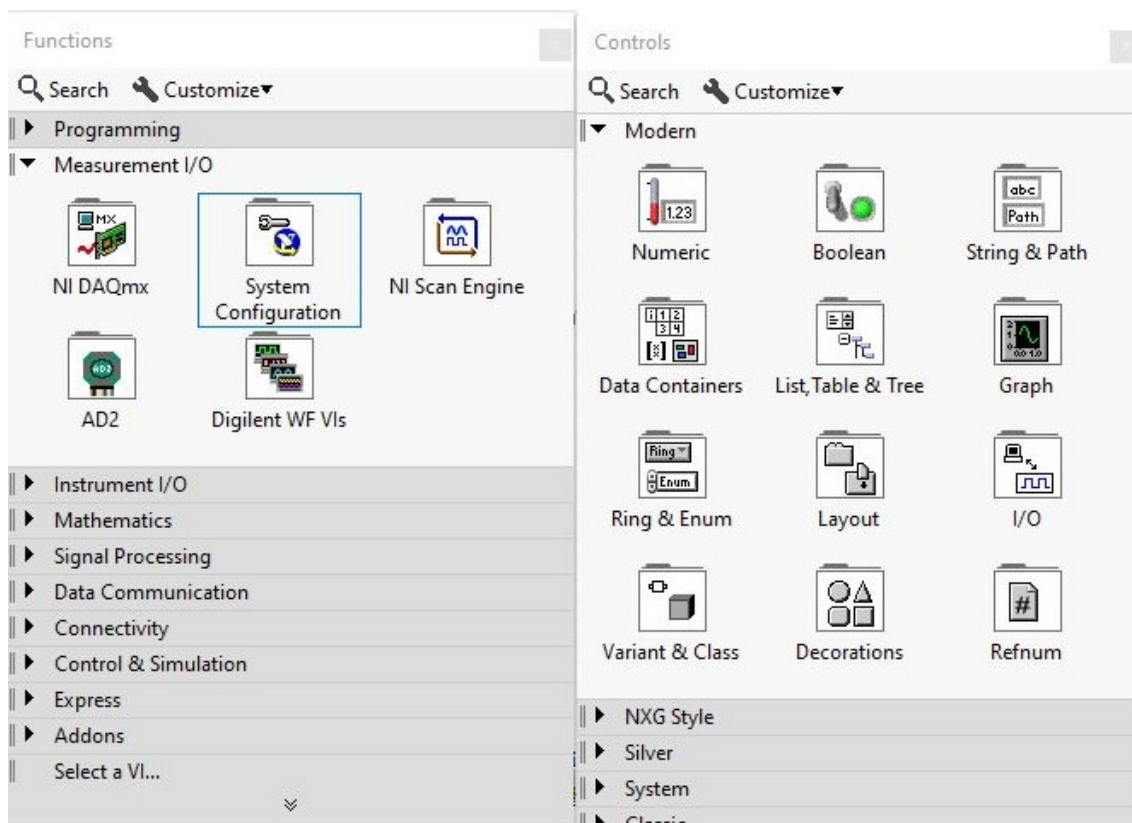
Obr. 5.1: LabView

Toto prostředí využívá grafický programovací jazyk LabView, který je určen pro vizualizaci vytvořené aplikace. Běžně používán pro získávání dat, řízení přístrojů a průmyslovou automatizaci na různých operačních systémech (OS), včetně Microsoft Windows, různých verzích Unixu, Linuxu a MacOSu. Vytváří programy, které se zde nazývají virtuální přístroje nebo VI, dále jen VI. Virtuálním přístrojem je nazván, protože svým vzhledem a činností je obdobou skutečných přístrojů, například osciloskopů nebo multimetrů. Termín VI je tedy obdobou termínu program nebo funkce v jiných programovacích jazycích. K vytváření takových programů obsahuje LabView širokou sadu nástrojů [26].

Toto prostředí má dvě hlavní části viz. obr. 5.2:

- Front panel - čelní panel - vizualizace VI.
- Block diagram - blokový diagram - program.





Obr. 5.2: Nabídka ve Block diagramu a Front panelu.

## 5.1 Front panel

Přední panel (Frontend) je sestaven pomocí ovládacích prvků a indikátorů. Ovládací prvky jsou vstupy umožňující uživateli poskytovat informace VI. Indikátory jsou výstupy ukazující nebo zobrazující výsledky založené na vstupech daných VI. Po otevření nového nebo existujícího VI se objeví okno frontendu VI a funguje jako grafické uživatelské rozhraní nebo GUI VI. Okno předního panelu obsahuje horní panel nástrojů a paletu Controls, ke které se dá přistoupit kliknutím pravým tlačítkem kdekoli na Frontend [26].

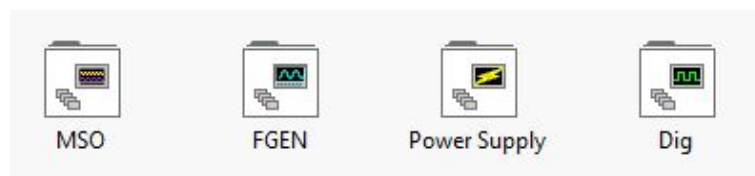
## 5.2 Block Diagram

Block Diagram (Backend), který je blokovým schématem, obsahuje grafický zdrojový kód. Všechny objekty umístěné na Fronendu se objeví na Backendu jako svorky. Backend také obsahuje struktury a funkce, které provádějí ovládání a poskytují údaje indikátorům. Struktury a funkce se nacházejí na paletě Funkce a mohou být umístěny na zadním panelu. Kolektivně se řídí, indikátory, struktury a funkce jsou označovány jako uzly. Uzly jsou navzájem propojeny pomocí vodičů, např. dvou ovládacích

prvků a indikátor může být zapojen do funkce přidávání tak, aby indikátor zobrazoval součet obou ovládacích prvků. Virtuální nástroj tedy může být spuštěn buď jako program s Frontendem sloužícím jako uživatelské rozhraní, nebo když je blokován jako uzel, Frontend definuje vstupy a výstupy uzlu přes konektorový panel. To znamená, že každý VI může být snadno testován, než bude vložen jako podprogram do většího programu [26].

## 5.3 Ovladače Digilent Waveforms

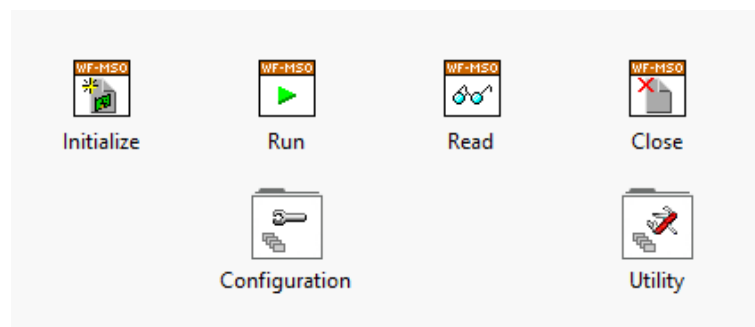
Sada ovladačů Waveforms od firmy Digilent usnadňuje automatizaci nástrojů pro zařízení Digilent v našem případě Analog Discovery 2. Obsahuje nástroje viz obr. 5.3 MSO (Mixed Signal Oscilloscope) pro nastavení měření a získávání dat z osciloskopů se smíšeným signálem, dále obsahuje FGEN (Function Generator) pro výstup vln s funkčním generátorem, DIG (Digital) pro čtení a zápis digitálních vstupů a výstupů a PWS (Power Supply) pro konfiguraci a řízení napájecích zdrojů.



Obr. 5.3: Ovladače Digilent Waveforms.

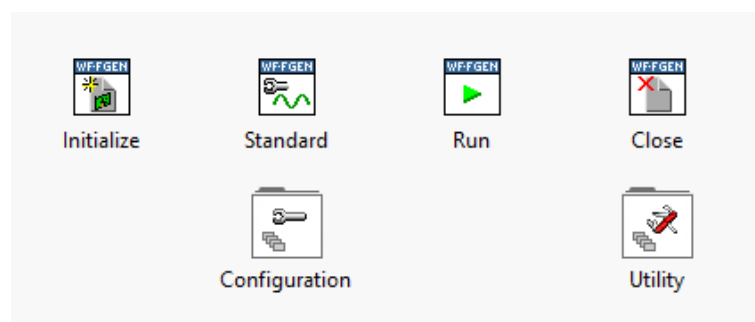
Pomocí těchto ovladačů lze sestavit osciloskop MSO za pomoci bloků Initialize, Run, Stop, Close. Bloky, jež se tu vyskytují navíc jsou MSO Configure Analog Channel, jak je z názvu už znát tak, zde probíhá nastavení kanálu, na kterém má osciloskop naslouchat, dalším blokem v pořadí je MSO Analog Edge Trigger, kterým se dá nastavit parametry Triggeru. Předposledním blokem je MSO Configure Timing a tady se nastavuje vzorkovací rychlost a časování osciloskopu. Posledním blokem je MSO Read, který zajišťuje zobrazení průběhu signálu, dokáže zobrazit, jak analogový, tak i digitální průběh.

Dalším prvkem, který lze za pomoci těchto ovladačů sestavit je generátor funkcí, který se skládá z hlavních součástí FGEN initialize, kde je možnost zvolit kanál pro komunikaci se zařízením, jméno na rozpoznání zařízení. Další součástí je FGEN Arbitrary Waveform, v této součásti probíhá definice vlastností signálu a tím i samotný signál. Například je zde možné definovat frekvenci, amplitudu, Duty Cycle a to celé pak jako jeden signál poslat do generátoru. Arbitrary Waveform může sloužit nejen jako generátor signálu ale i pro posílání binárních dat. Díky čemuž se dá poslat například slovo nebo věta, která se převede do binárního zápisu, na osciloskop, kde se



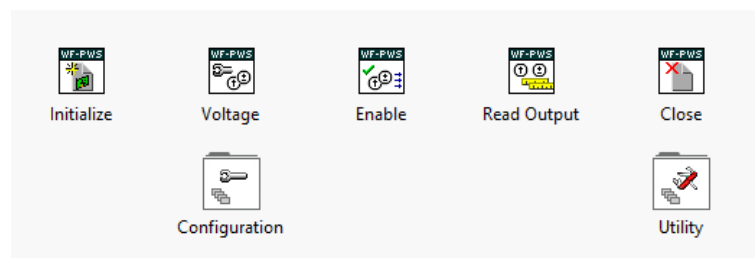
Obr. 5.4: Osciloskop MSO.

zobrazí v průběhu. Dalším blokem generátoru je FGEN Run, který zajišťuje vyslání generovaného signálu, předposlední blok je FGEN Stop, který zastaví generování a posledním blokem je FGEN Close, ten uzavře spojení s generátorem.



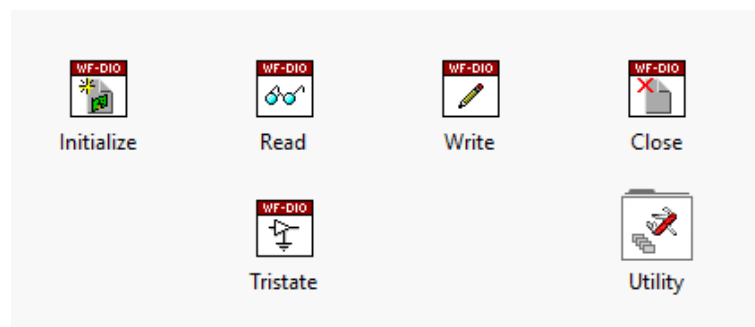
Obr. 5.5: Generátor funkcí FGEN.

Předposledním nástrojem těchto ovladačů je paleta Power Supply, která slouží jako přídatný zdroj. Nachází se zde bloky Initialize, Voltage, Enable, Read Output a Close. Initialize slouží pro navázání spojení s AD2, v bloku Voltage nastavujeme přídatné napětí a Enable blok zapíná výstup. Blok Read Output udává aktuální hodnotu napětí a proudu. Close blok uzavírá spojení.



Obr. 5.6: Přídatný zdroj Power Supply.

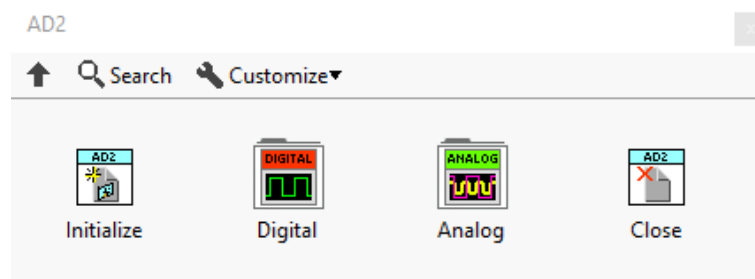
Poslední nástroj těchto ovladačů se nazývá Digital a slouží pro čtení a zápis digitálních vstupů a výstupů.



Obr. 5.7: Paleta Digital.

## 5.4 Ovladače AD2 Toolkit

Tyto ovladače jsou doplňkem ovladačů Digilent Waveforms, rozšiřují možnosti AD2 a díky nim je možné AD2 využít více způsoby, dělá to z něj všestranný mikrokontrolér. Tato sada ovladačů má větší kontrolu nad analogovými a digitálními kanály, obsahují velkou knihovnu tzv. subVI, což jsou malé samotné programy, které se implementují do rozsáhlejších VI, z těchto knihoven pro GUI, byl použit „Dwf Analog in channel filter set“, který zajišťuje filtrování signálu. Bez tohoto subVI, by bylo snímání a nastavování signálu, podstatně složitější.



Obr. 5.8: AD2 Toolkit.

## 6 REALIZACE SENZORICKÉHO SYSTÉMU

### 6.1 Použitá zařízení a model pro demonstraci

Základ senzorického systému tvoří multifunkční zařízení Analog Discovery 2, ke kterému byl původně připojen BNC adaptér, jenž má možnost připojení 2 samostatných kanálů, z nichž byl využit první kanál pro komunikaci s interferometrem. Nakonec byl, ale BNC adaptér odstraněn a byl na místo něj připojen malý kabel aby se ušetřilo místo v kolem interferometru. Analog Discovery 2 byl vsazen dovnitř modelu.

Pro tuto práci byl optimalizován Machův-Zehnderův interferometr, který byl implementován do modelu krajiny, pro demonstraci senzorického systému. Machův-Zehnderův interferometr byl zvolen, protože se porovnává v jeden okamžik signál v měřicím vlákne a v referenčním, proto můžeme detekovat vibrace v reálném čase, s co nejmenším zpožděním. Interferometr je sestaven v pouzdru a uložen uvnitř modelu krajiny viz obr. 6.1. Referenční vlákno interferometru je implementováno uvnitř modelu a měřicí vlákno je vedeno přes vrchní část modelu, kde je uloženo v zemině pro tento případ byl použit písek. Tím, že jsou tyto vlákna situovány v jiné části modelu je možné detekovat změny v prostředí v tomhle případě vibrace na povrchu.

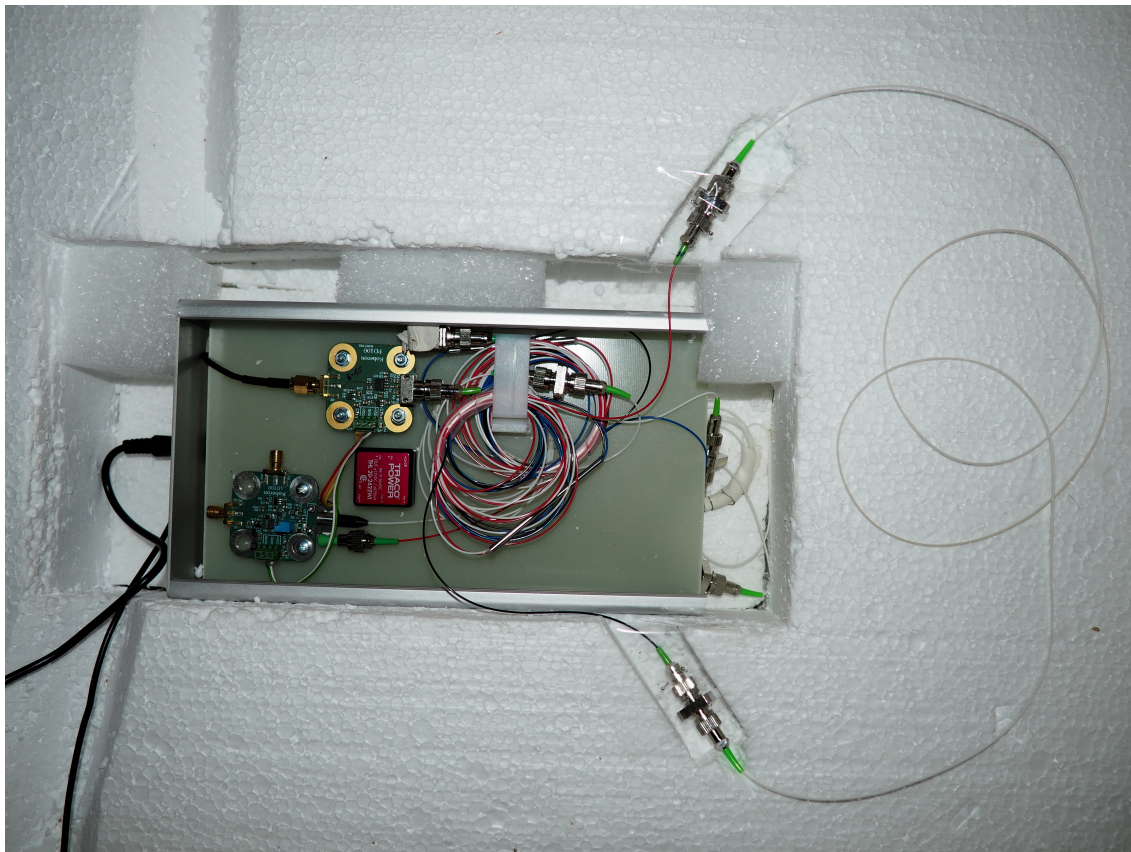
Při sestavování interferometru bylo dbáno na to aby všechny spojovací členy a kontakty byly řádně očištěny a spojeny, aby nedošlo k utlumení nebo znehodnocení signálu. Je nutné vyčistit spoje z důvodu nežádoucího zvýšení útlumu a tím snížení přesnosti měření, hlavně u interferometrů využívající delší vlákna. Bylo dbáno, aby při sestavování modelu nebyl velký ohyb vlákna a to z důvodu zvýšení útlumu.

#### 6.1.1 Laser LD100 Koheron

Základem interferometru, který byl využit pro tuto práci, je nízko šumový laser LD100 od společnosti Koheron viz obr. 6.3. Pracuje s vlnovou délkou 1550 nm, má integrovaný proudový ovladač. Proud se nastavuje přesným trimrem od 0 do 55mA a pracuje při napětí 3,3 V. LD100 je vybaven modulačním vstupem spojeným se střídavým proudem pro proudovou modulaci od 1 kHz do 200 MHz. LD100 má typickou spektrální šířku pásma 3 MHz.

#### 6.1.2 Fotodetektor PD100 Koheron

Fotodetektor PD100 od společnosti Koheron, viz obr. 6.4, zaznamená signál na druhé straně interferometru. Fotodetektor PD100 pracuje se šířkou pásma nad 100 MHz a má implementovanou fotodiodu InGaAs.



Obr. 6.1: Machův-Zehnderův interferometr implementovaný v modelu krajiny.

### 6.1.3 Použitá optická vlákna

Pro sestavení interferometru byly použity speciální jednovydová optická vlákna s plastovým pláštěm, který je oproti běžným vláknům tenčí. Plášť použitého vlákna je silný  $900\text{ }\mu\text{m}$ . Tyto vlákna byly použity jako měřicí a referenční vlákno. Měřicí vlákno je v tomto případě vedeno přes vrchní část modelu a referenční vlákno je uloženo ve spodní části modelu, aby na sebe navzájem nepůsobily, v tom smyslu aby se nerušily hodnoty obou vláken, když na jedno z nich bude působit měřená veličina.

### 6.1.4 Měnič THL 20-2422WI

K napájení laseru a fotodetektoru byl použit měnič THL 20-2422WI, viz obr. 6.4, který dosahuje výstupního výkonu 20 W. Výstupní napětí a proud je u tohoto zdroje 12 VDC a 835 mA.



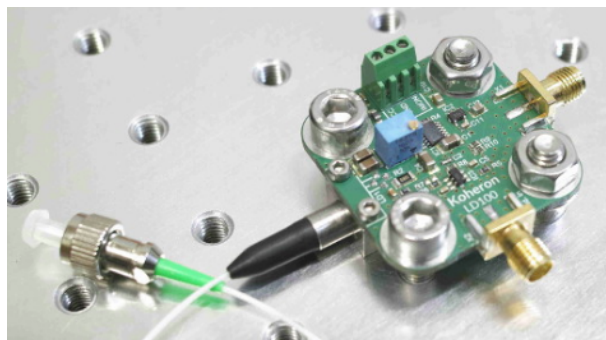


Obr. 6.2: Model krajiny pro testování senzorického systému.

### 6.1.5 Vizualizace a funkce senzorového systému

Pro potřeby této práce byl vyroben model krajiny pro vedení optického vlákna. Tento model se skládá ze dřevěné nádoby, do které byl implementován interferometr. Interferometr je obklopen tlumícím materiálem aby na něj nepůsobil žádný vnější vliv a je uložen v útrobách modelu. Horní část modelu prezentuje krajinu, kde na jedné půlce je louka/pole a na druhé je písek, reprezentující zeminu. Pod tímto pískem je vedeno měřící rameno interferometru. Obě poloviny jsou od sebe odstíněny různými materiály, pod „loukou“ je tlumící vata, a proto tato část slouží jako klidová zóna.

Vezme-li se například model bagru, tak je možné demonstrovat vlastnosti senzorického systému. Při pojezdu bagru přes klidovou zónu, senzorický systém nijak nezareaguje, dále při pojezdu bagru z klidové zóny na druhou polovinu z písku, senzorový systém zahlásí, že v oblasti je zvýšený pohyb, detekuje tento pohyb na základě zvýšených vibrací. Závěrečnou vlastností je, že při inicializování výkopových prací v oblasti s vláknem, vyhodnotí senzorový systém jako nebezpečný pohyb a vyšle varování obsluze optické trasy, že se na optické trase vyskytuje pohyb ohrožující samotné vlákno, aby nedošlo k porušení vlákna.



Obr. 6.3: Laser LD100.



Obr. 6.4: Fotodetektor PD100 a měnič THL 20-2422WI.

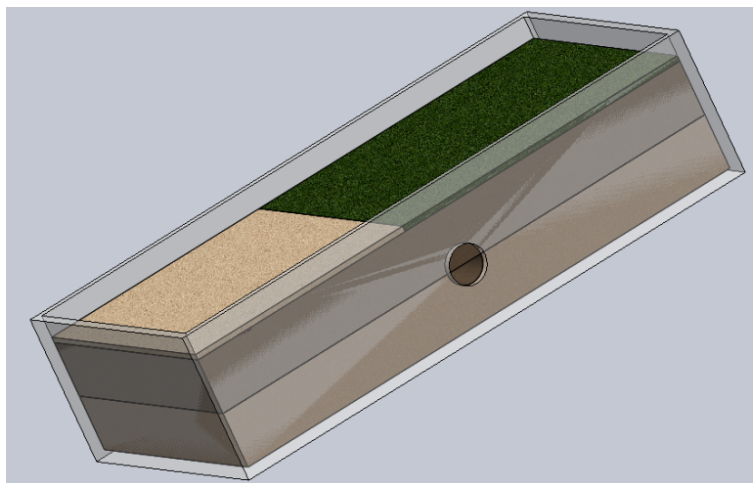
Pro realizaci modelu krajiny byl vytvořen 3D model, který slouží pro vizualizaci viz obr. 6.5.

## 6.2 Realizace GUI

Pro tuto práci byl vytvořen program v LabView, který slouží pro zpracování naměřených dat, včetně analýzy dat a jejich parametrů. Tento program zajišťuje, že celý senzorický systém pracuje v reálném čase. V rámci tohoto programu byly řešeny tyto části:

- Komunikace a nastavení Analog Discovery 2
- Snímání a ovládání signálu v reálném čase
- Detekce prahové úrovně signálu a následná analýza
- Záznam a uložení naměřených dat do souboru
- Ovladač pro převedení signálu na audio signál





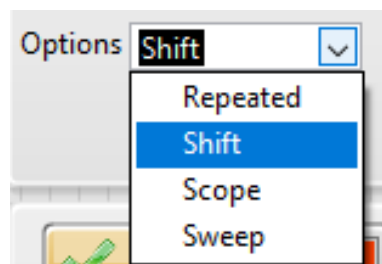
Obr. 6.5: 3D model demonstračního senzorického systému.

Hlavní část programu je zabalena do While loopu, což znamená, že pracuje opakovaně, dokud není manuálně ukončena uživatelem a to tlačítkem STOP. Mimo hlavní část programu se nachází paralelně While loop, doplněk k audio ovladači a While loop pro výpis varovných a chybových hlášek. Tyto While loopy jsou propojeny centrálním tlačítkem STOP a způsobují, že se jedním tlačítkem zastaví kompletně celý program.

## Komunikace a nastavení Analog Discovery 2

Po připojení Analog Discovery 2 k PC, byl nainstalován program Waveforms, který slouží jako ovladač tohoto zařízení, zde byla prověřena funkčnost zařízení a pochopení, jak toto zařízení ovládat. V programu Waveforms byl vytvořen cvičný signál na obou kanálech BNC adaptéru, pomocí generátoru, který byl následně i zaznamenán na osciloskopu.

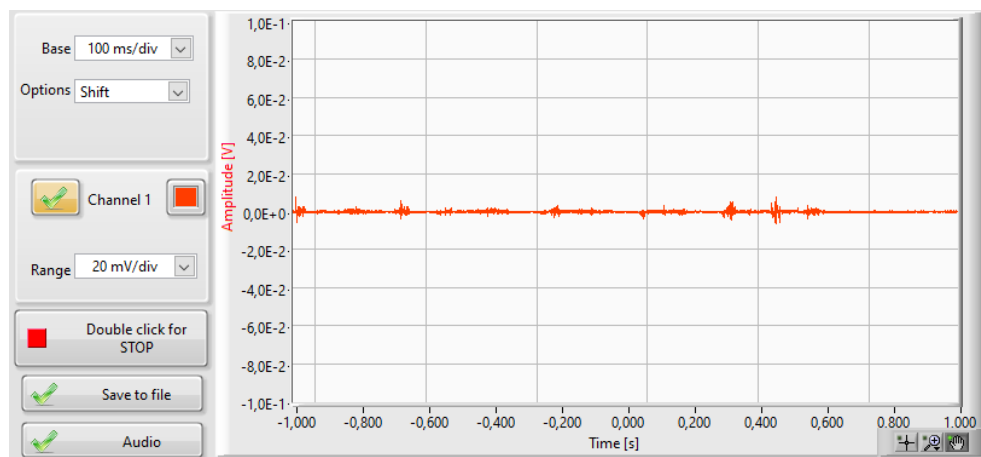
Tímto byla ověřena funkčnost zařízení. Přišlo na řadu vývojové grafické prostředí LabView, kde bylo potřeba po první instalaci nahrát ovladače Digilent Waveforms, které dokáží ovládat zařízení Analog Discovery 2, jako další ovladače byly nahrány ovladače AD2 toolkit, z těchto ovladačů byl využit analogový filtr, tento filtr pomohl usměrnit vstupní signál. Po nahrání správných ovladačů byla zahájena tvorba osciloskopu pro snímání signálu interferometru. Pro nastavení osciloskopu bylo využito bloků MSO Configure timing a MSO Configure Analog Channel. Po sestavení osciloskopu, proběhlo nastavení triggeru, kam spadá například Sample rate, Pretrigger Time, Acquisition Time. Osciloskop je nastaven na první kanál AD2, kam je připojen i interferometr. Tyto dva bloky jsou uzavřeny ve struktuře, která je závislá na výběru z položky Options, kde je na výběr ze čtyřech možností viz obr. 6.6.



Obr. 6.6: Nabídka Options.

Zobrazení Repeated zobrazuje vždy úsek signálu, který po určité době přepíše dalším úsekem signálu v řadě. Zobrazení Scope je klasické zobrazení, které je známo z osciloskopů, kde se signál zobrazuje na pravém okraji grafu a běží k levému okraji grafu a po dosažení pravého okraje se načte na levý okraj a zase běží doprava. Dalším zobrazením je Sweep, kde signál z pohledu uživatele stojí a přes tento signál běží kurzor, který signál aktualizuje. Pro tento senzorický systém je neoptimálnější zobrazení Shift, které zobrazí signál na pravém okraji grafu a běží k levému okraji, kterého nedosáhne.

### Snímání a ovládání signálu v reálném čase



Obr. 6.7: Výstupní graf s nastavením.

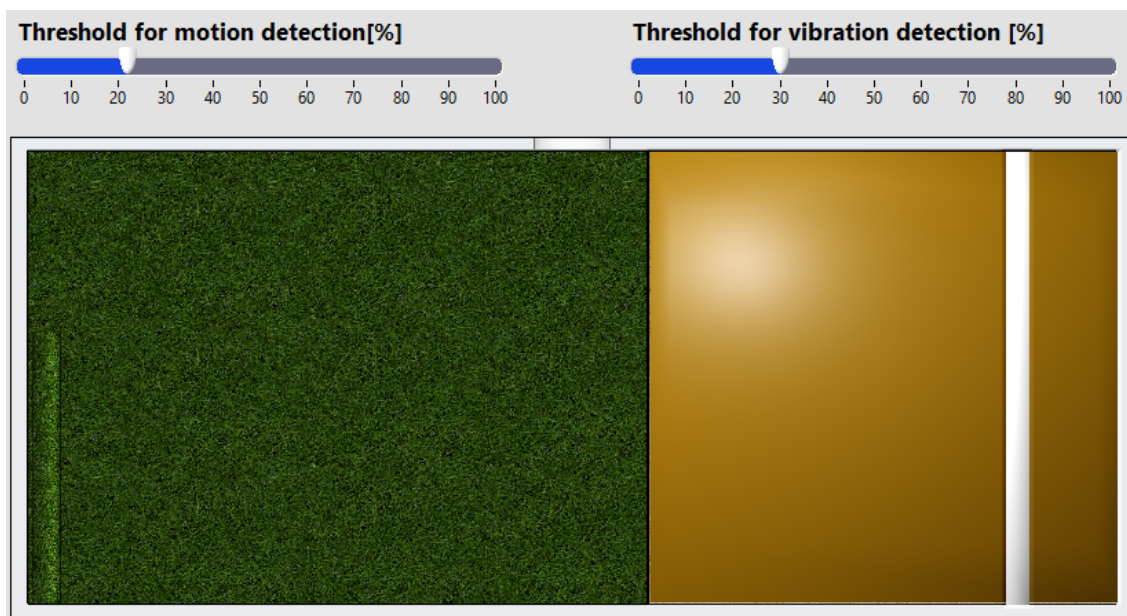
Princip Machův-Zehnderova interferometru je v tom, že porovnává signál mezi dvěma rameny. Když je referenční rameno v klidu a na měřící rameno působí nějaký vnější vliv, v tomhle případě vibrace, tak na vstupu fotodetektoru nastane rozdíl optické fáze, který je detekován osciloskopem. Jestliže nastane tento případ, tak se to projeví změnou amplitudy v závislosti na čase. Pro tento případ byl uzpůsoben graf na výstupu osciloskopu. V programu u grafu máme definované parametry, a

to Range a Base, pomocí těchto parametrů je možné upravovat snímaný signál. Za pomoci Base modifikujeme osu X, tedy časovou základnu a parametr Range mění rozsah amplitudy na dílek v grafu. Oba tyto parametry je možné měnit za běhu programu. Pro sestavení osciloskopu byly využity bloky MSO Run a MSO Read. MSO Run zahajuje měření signálu a MSO Read načítá analogový nebo digitální průběh, který se možné si zobrazit.

Na obr. 6.7 je vidět výstupní graf s nastavením, kde je možné měnit barvu signálu a je zde možné zapnout a vypnout kanál, na kterém běží signál. Tlačítko STOP zastaví kompletně celý program. Tlačítkem Save to file, je možné uložit naměřené hodnoty do souboru a tlačítko Audio přidá ke snímanému signálu zvuk.

### Detekce prahové úrovně signálu a následná analýza

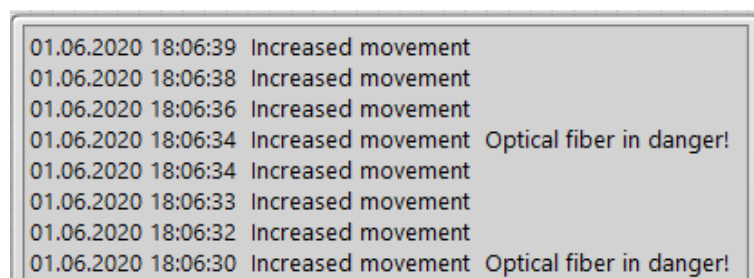
Součástí programu je detekce prahové úrovně. Byly vytvořeny dvě kritéria pro detekci prahové úrovně a to pro detekci vibrací pro pohyb v oblasti vlákna a pro detekci vibrací přímo nad vláknem.



Obr. 6.8: Klidový stav senzorického systému.

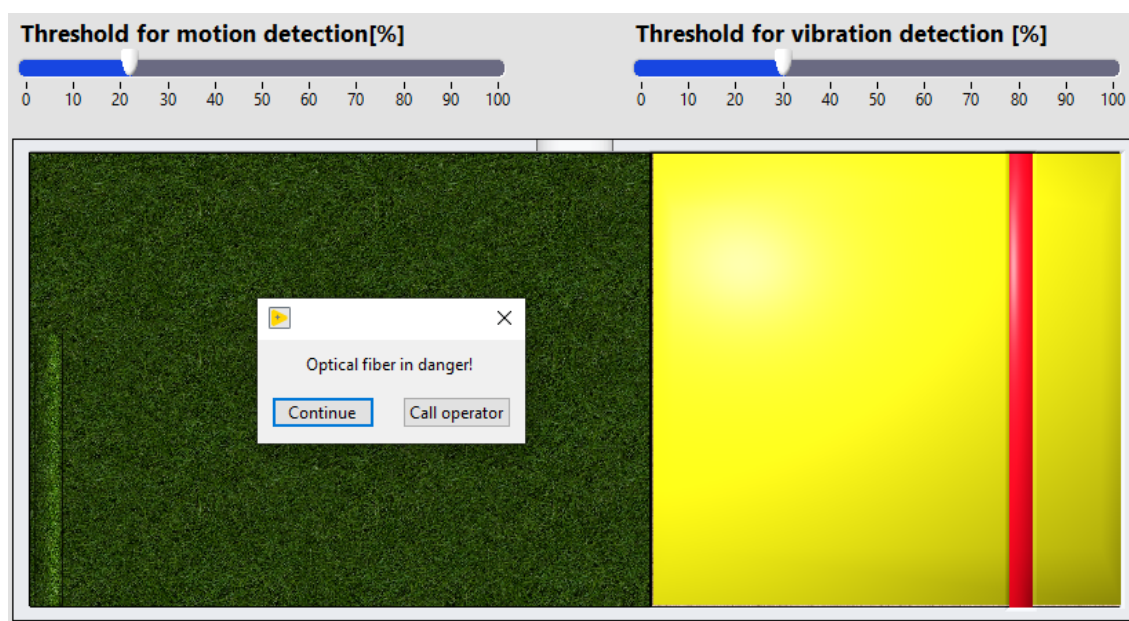
Obě kritéria se nastavují v procentech viz obr. 6.8. Hodnota % je odvozena od procentuálního zvětšení amplitudy signálu, oproti normálu. V praxi to znamená, že když bude v oblasti, kde se nachází vlákno, jezdit s nějakým strojem, například bagrem a překročí předem nastavenou úroveň, tak program bude vibrace stroje detekovat a zobrazí upozornění, že je zvýšena aktivita v blízkosti vlákna viz obr. 6.9.

Případ detekce vibrací přímo nad vláknem je naprogramován tak, že narušením zeminy, například výše zmíněným bagrem, který začíná nabírat zeminu svou lžicí,



Obr. 6.9: Indikátor aktivity v oblasti vlákna.

způsobí několika násobně větší vibrace a to program vyhodnotí varováním, že v těsné blízkosti vlákna je nebezpečný pohyb, tím pádem se rozsvítí červená dioda na nákresu modelu v oblasti viz obr. 6.10, která zde zastupuje vlákno na reálném modelu a zobrazí se vyskakovací okno, kde je na výběr ze dvou možností. První možnost je zavolání obsluhy aby nedošlo k poškození uloženého vlákna a druhá nabídnutá možnost je pokračování v měření. Program v této fázi je definován rozhodovací logikou, zda je amplituda signálu vyšší, než předem definovaná hodnota.

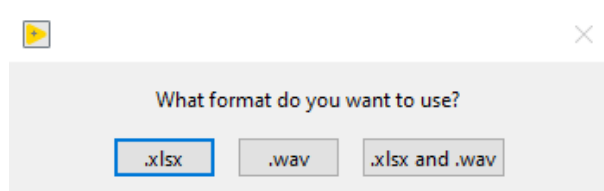


Obr. 6.10: Indikace překročení nastavené úrovně.

### Záznam a uložení naměřených dat do souboru

Další rozšíření programu je možnost uložit naměřená data do souboru. Tato část funguje tak, že po stisknutí tlačítka SAVE TO FILE a zastavení měření, se zobrazí vyskakovací okno, které se nás zeptá v jakém formátu chceme naměřená data uložit.

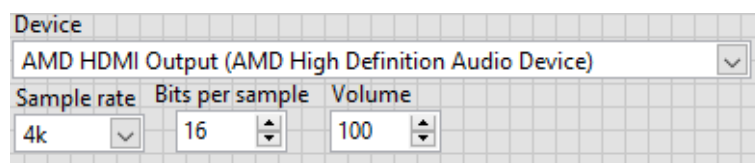
Na výběr jsou 3 možnosti a to formáty \*.xlsx, \*.wav a nebo oba zároveň viz obr. 6.11. Po vybrání jednoho z nich se otevře dialogové okno pro uložení souboru na disk. Levé tlačítko zajišťuje uložení do formátu .xlsx, kdy části signálu pomocí bloku Write to Measurement File zapíše do tabulky. Prostřední tlačítko uloží signál do formátu .wav, byl k tomu použit blok Sound File Write Simple, kterého se posílá signál a nakonec pravé tlačítko je kombinací předchozích dvou.



Obr. 6.11: Nabídka formátů pro uložení signálu.

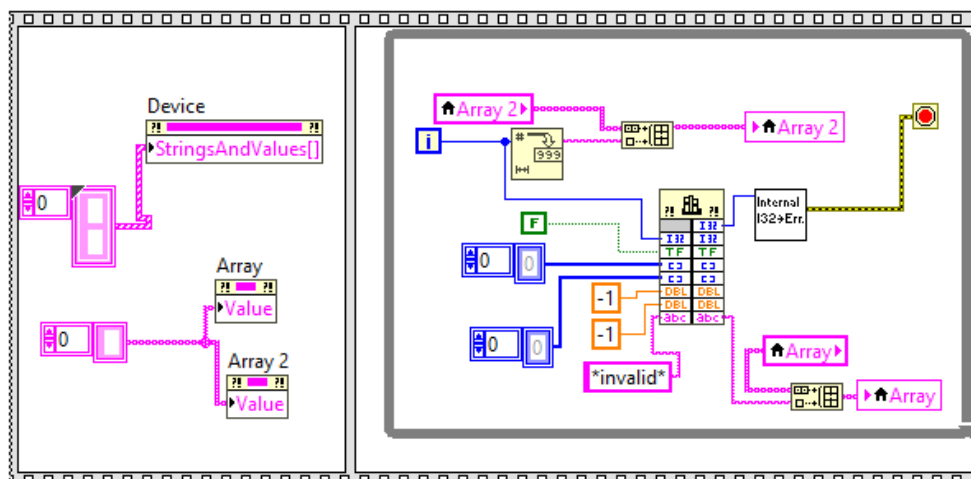
### Ovladač pro převedení signálu na audio signál

Poslední část programu se věnuje možnosti přidat zvuk do měřeného signálu, což znamená, že po zapnutí měření, signál i uslyšíme. Toto rozšíření je velice platné, když jsou změny v signálu v grafu nepatrné, dávají nám možnost je detekovat sluchem namísto zrakem. Tento zvukový ovladač je naprogramován tak, aby se po stisknutí tlačítka napojil na zvukovou kartu počítače a přes reproduktory reprodukoval zvuk signálu. Ovladač je rozšířen i o nastavení zvuku třemi prvky a to Sample rate, Bits per sample a Volume.



Obr. 6.12: Nastavení parametrů Audio ovladače.

Tyto tři prvky jsou skryty a objeví se až po stisknutí tlačítka Audio. Blok Audio tvoří bloky Sound Output Configure, kde se nastavuje Sample Rate, Bit per sample a načítá se zvuková karta počítače, další blok Set Output Volume zajišťuje nastavení výstupní hlasitosti a Set Output Write bere hodnoty z grafu, které jsou poté slyšitelné. Pro načítání zvukové karty byla vytvořena speciální část programu viz obr. 6.13, která zjišťuje dostupnost zvukových karet a následně ty, které se dají využít zobrazí.



Obr. 6.13: Doplněk pro načítání dostupné zvukové karty.

### 6.2.1 Použití senzorického systému v praxi

Tento senzorický systém byl vyvinut i pro využití v praxi. Je možné ho implementovat na optickou trasu, kde povede například několik desítek až stovek optickým vláken. Vyčlení-li se jedno vlákno pro detekci vibrací, tak je možné za pomoci tohoto senzorického systému chránit celou soustavu vláken před fyzickým narušením, například při výkopových pracích. Díky tomuto systému známe klidový stav, kdy zařízení nedetekuje žádné vibrace a tím lze okamžitě reagovat, když nastane nezvyklý pohyb v okolí vlákna, nebo celé optické trasy.

### 6.2.2 Možnosti rozšíření senzorového systému

Celý senzorový systém by šel rozšířit a to při když bude tento systém implementován na několika kilometrovou trasu, tak by mohl být rozšířen o měření vzdálenost, kde nastane překročení nastavené úrovně pro nebezpečný pohyb.

# ZÁVĚR

V této diplomové práci byly popsány optické vlákna, optické vláknové senzory a byl vytvořen návrh realizace sensorového systému. První kapitola se věnuje optickým vláknům, jejím druhům a stavbě vlákna. U každého typu vlákna jsou alespoň stručně popsány výhody a nevýhody použití.

V druhé kapitole byly popsány vlastnosti optického vlákna, hlavně optický útlum a disperze. U disperze bylo provedeno rozdělení na typy a dále byly detailně popsány nelineární jevy při optickém přenosu, kam spadají rozptyly (Mieův, Rayleighův, Ramanův, Brillouinův, aj.).

Kapitola třetí se věnuje detailnímu rozboru optických vláknových senzorů, byly zde popsány druhy senzorů, jako amplitudové, fázové a nebo senzory mřížkové. Amplitudové obsahují senzory se změnou útlumu, změnou indexu lomu, s porušením okrajových podmínek, dynamickou vzájemnou vazbou a s emisí záření. Fázové senzory obsahují Machův-Zehnderův, Michelsonův a Sagnacův interferometr, z nichž byl vybrán Machův-Zehnderův a pomocí něj byl vytvořen sensorický systém. Podkapitola mřížkové senzory skrývá druhy vláknových mřížek a jejich senzory.

V kapitole čtvrté a páté bylo popsáno programové a hardwarové vybavení pro realizaci sensorového systému, spadá sem Analog Discovery 2 a jeho součásti a z programového vybavení např. grafické vývojové prostředí LabView. V páté kapitole byly současně detailně popsány ovladače Analog Discovery 2.

Poslední šestá kapitola se zabývá realizací sensorického systému a jeho GUI, kde je přesně popsáno, jak bylo při realizaci postupováno a co vše bylo použito.

Pro tuto práci byl postaven model krajiny a v něm byl implementován Machův-Zehnderův interferometr, který byl optimalizován pro detekci vibrací. Ovládací program byl řešen v grafickém programovém prostředí LabView, a který pracuje v reálném čase. Při běhu programu lze měnit parametry a to nastavování prahové úrovně a nastavení osciloskopu, dále je možné data uložit do souboru a nebo k měřeným datům přidat zvykovou stopu, aby byly měřená data slyšitelná.

Sensorický systém byl postaven a testován s modelem bagru. Pro pohyb určitého bagru byly odladěny prahové úrovně, určené k detekci. Při pojezdu bagru byla nastavena prahová úroveň na 20 % a pro detekci vibrací, které by mohly ohrozit vlákno byla nastavena prahová úroveň na 35 %, avšak pro jiný druh bagru, či jiného stroje mohou být tyto úrovně změněny. V této práci bylo dosaženo všech cílů a bylo splněno zadání.



# LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. Základy fotoniky: Fundamentals of photonics. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-858-6300-6.
- [3] FILKA, Miloslav. Optické sítě: přednášky [online]. Brno, 2007 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z URL:<[https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke\\_site\\_prednasky\\_P.pdf](https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/Opticke_site_prednasky_P.pdf)>. VUT.
- [4] ČTYROKÝ, Jiří. Integrovaná optika. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [5] Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:<<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/557-opticka-vlakna>>
- [6] PC Tuning – Technologie přenosu dat vlákna [online]. [vid. 2019-12-03]. Dostupné z URL:<<http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie-prenosu-dat-pres-opticka-vlakna>>
- [7] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z URL:<<http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>. Dokument. VŠB.
- [8] FILKA, Miloslav. Přenosová média [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:<<https://optolab.utko.feec.vutbr.cz/wp-content/uploads/BPRM.pdf>>. Dokument. VUT.
- [9] MAŇÁK, Roman. Rayleighův a Mieův rozptyl I. Inflow: Parhelium [online]. 2007, č. 3. [vid. 2019-11-25]. Dostupné z URL:<<http://ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf>>
- [10] DADO, Milan. Kapitoly z optiky: pre technikov [online]. Žilina: EDIS, 1998 [cit. 2019-11-20]. ISBN 80-710-0390-5. Dostupné z URL:<[http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado\\_Milan\\_Kapitoly\\_z\\_optiky/kapitoly\\_z\\_optiky.pdf](http://katalog.utc.sk/e-books/books/pdf/Dado_Milan_Kapitoly_z_optiky/kapitoly_z_optiky.pdf)>
- [11] GUO, Y. Nonlinear photonics: nonlinearities in optics, optoelectronics, and fiber communications. New York: Springer, c2002. ISBN 978-354-0431-237.



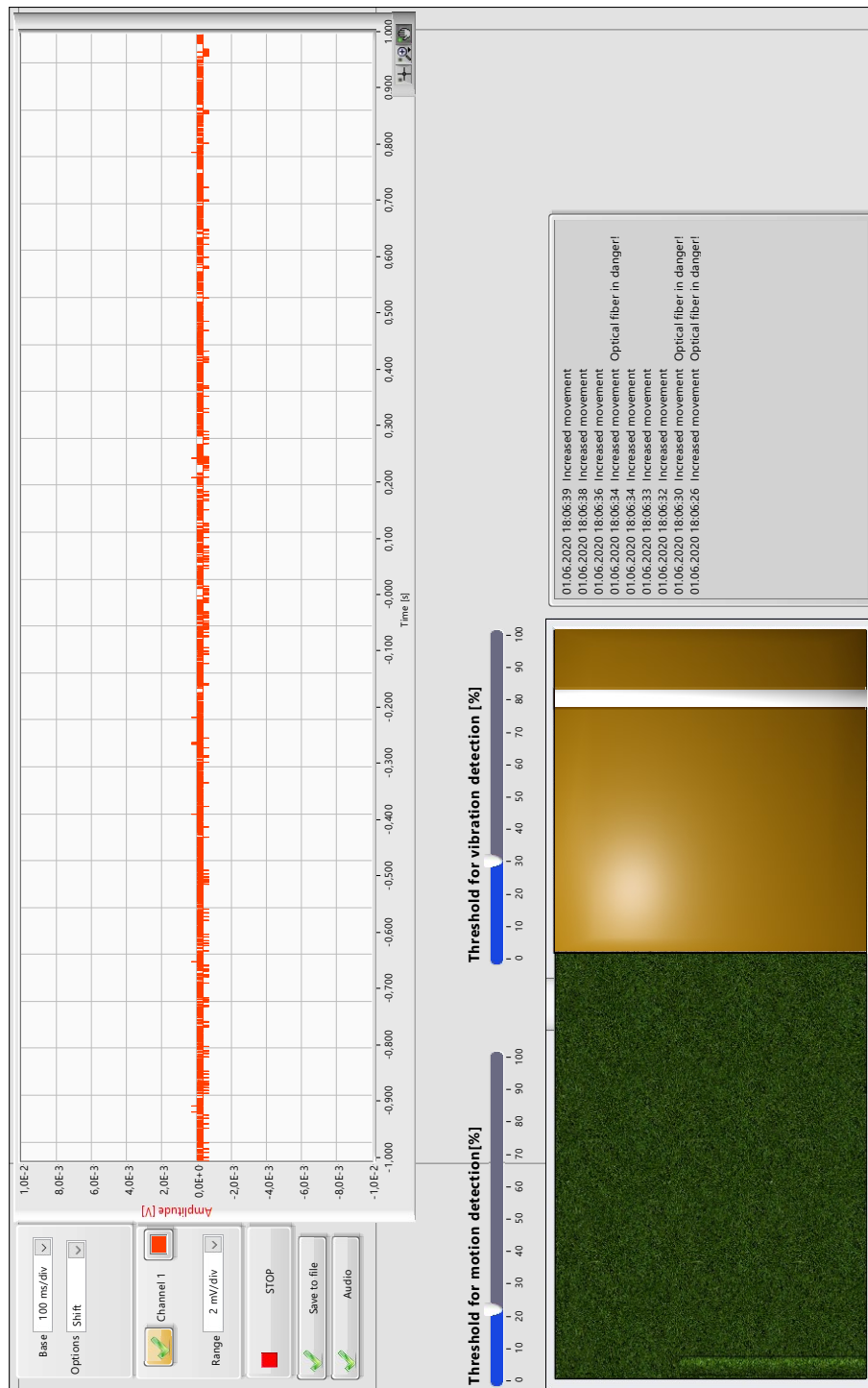
- [12] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 978-80-7300-184-1.
- [13] UDD, Eric a William B. SPILLMAN. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011. ISBN ISBN978-0-470-12684-4.
- [14] DISTRIBUOVANÉ OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-12-11]. Dostupné z URL: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=67671](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67671)>. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. PETR MÜNSTER.
- [15] TURÁN, J. a S. PETRÍK. Optické vláknové senzory. Bratislava, 1990, 250 s. ISBN 80-050-0655-1.
- [16] ČÍP, O.; BUCHTA, Z. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie [online]. [cit. 2019-11-30], 36 s . Dostupné z URL <[http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1110.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf)>.
- [17] FEJT, Radek. Optický vláknový gyroskop. Senzory | Úvodem [online]. 2012 [cit. 2019-11-29]. Dostupné z URL:<<http://senzory.aspone.cz/ovg.htm>>
- [18] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. Handbook of optical fibre sensing technology. New York: Wiley, 2002. ISBN 04-718-2053-9.
- [19] Pochi Yeh, Amnon Yariv, and Emanuel Marom, "Theory of Bragg fiber\*", J. Opt. Soc. Am. 68, 1196-1201 (1978)
- [20] OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Boston, Mass.: Artech House, c1999. ISBN 08-900-6344-3.
- [21] CHI SHING, Cheung. An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot interferometer for sensing applications [online]. 2005 [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: URL:<<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/904/full%20thesis%20shing.p;jsessionid=5FA54C855C55A4588169AE6EC278BCCE?sequence=2.PhdThesis.CranfieldUniversity.VedoucípráceDr.S.W.James>>
- [22] Analog Discovery 2. Digilent [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z URL:<<https://reference.digilentinc.com/reference/instrumentation/analog-discovery-2/start?redirect=1>>

- [23] Digilent [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z URL:<<https://store.digilentinc.com/bnc-adapter-for-analog-discovery/>>
- [24] Mauser [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z URL:<<https://cz.mouser.com/new/digilent/digilent-analog-discovery-2/>>
- [25] Digilent Waveforms [online]. [cit. 2019-11-29]. Dostupné z URL:<<https://reference.digilentinc.com/reference/software/waveforms/waveforms-2/reference-manual>>
- [26] National Instruments [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z URL:<<http://www.ni.com/product-documentation/7566/en/>>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| <i>AD2</i> | Analog Discovery 2             |
| <i>BNC</i> | Bayonet Neill Concelman        |
| <i>FBG</i> | Vláknová Braggova mřížka       |
| <i>GUI</i> | Grafické uživatelské rozhraní  |
| <i>I/O</i> | Vstup/výstup                   |
| <i>MM</i>  | Vícevidový                     |
| <i>MZI</i> | Machův-Zehnderův Interferometr |
| <i>NA</i>  | Numerická apertura             |
| <i>OV</i>  | Optické vlákno                 |
| <i>OVS</i> | Optický vláknový senzor        |
| <i>SM</i>  | Jednovidový                    |
| <i>USB</i> | Univerzální seriová sběrnice   |
| <i>UV</i>  | Ultrafialové                   |
| <i>VI</i>  | Virtual instruments            |

# A PŘÍLOHY



Obr. A.1: Frontend senzoričkého systému.